



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

EFFECTE DEL PROCÉS DE BRUNYIT EN ELS ACERS INOXIDABLES AUSTENÍTICS METAESTABLES



Memòria i Annexos

Autor:	Roger Enric Gonzalez Acevedo
Director:	Gemma Fargas Ribas
Co-Director:	Ramón Jerez Mesa
Convocatòria:	Maig 2018

ÍNDEX

RESUM	6
RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
AGRAÏMENTS.....	9
CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ	10
1.1. Els Acers Inoxidables	10
1.1.1. Efecte i funció dels elements d'aliatge	12
1.1.2. Classificació dels tipus d'acers inoxidable	13
1.1.3. Nomenclatura.....	15
1.2. Els Acers Inoxidables Austenítics	16
1.2.1. Composició química	16
1.2.2. Els elements d'aliatge i la seva influència.....	17
1.2.3. Microestructura	19
1.2.4. Propietats físiques i mecàniques	19
1.3. Els Acers Inoxidables Austenítics Metastables	21
1.4. Transformació Martensítica.....	23
1.4.1. Transformació martensítica mitjançant un tremp	28
1.4.2. Transformació martensítica induïda mecànicament	31
1.5. Procés de brunyit	34
1.5.1. Brunyit amb bola	36

1.5.2. Brunyit amb bola assistit per vibració.....	38
1.5.3. Eina de brunyir	40
CAPÍTOL 2: PROCEDIMENT EXPERIMENTAL	48
2.1. Material estudiat.....	48
2.1.1. Composició química	48
2.1.2. Microestructura	49
2.1.3. Propietats físiques	50
2.1.4. Propietats mecàniques	51
2.2. Metodologia	51
2.3. Selecció de les variables del procés de brunyit	52
2.3.1. MiniTab.....	54
2.3.2. Variables del procés de brunyit definitives	55
2.4. Tractament superficial de brunyit	55
2.5. Preparació de les mostres.....	56
2.6. Caracterització de la superfície.....	61
2.6.1. Rugositat.....	61
2.6.2. Microscopi òptic confocal	63
2.6.3. Microscopi òptic de rastreig (SEM).....	64
2.6.4. Interferòmetre	65
2.7. Caracterització mecànica	67
2.7.1. Microduresa	67
CAPÍTOL 3: RESULTATS I DISCUSSIÓ	71
3.1. Resultats de la selecció de variables del brunyit	71

3.1.1. Representació numèrica dels resultats	71
3.1.2. Representació gràfica amb MiniTab	73
3.1.3. Observacions en el comportament de l'acer.....	75
3.2. Anàlisi superficial de les petjades.....	75
3.2.1. Resultats de la Microscòpia òptica confocal	75
3.2.2. Resultats del Rugosímetre 3D	77
3.2.3. Resultats del microscopi electrònic de rastreig.....	80
3.3. Anàlisi de la microduresa de les petjades	82
3.3.1. Perfil de dureses	84
CAPÍTOL 4: ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL.....	88
CAPÍTOL 5: CONCLUSIONS	90
CAPÍTOL 6: PRESSUPOST	92
CAPÍTOL 7: BIBLIOGRAFIA	94
ANNEX A	97
A1. Resultats obtinguts mitjançant microscòpia òptica làser	97
I. Resultats obtinguts amb el Microscopi òptic confocal.....	97
A2. Resultats obtinguts de la rugositat superficial	100
I. Resultats obtinguts amb el Rugosímetre 3D	100
II. Resultats obtinguts amb l'interferòmetre	103
A3. Resultats obtinguts amb microduròmetre	104
I. Taules numèriques de les dureses	104
II. Gràfiques dels perfils de duresa.....	104

RESUM

Els acers inoxidables austenítics metastables formen part de la família d'acers d'alta resistència, els quals presenten unes excel·lents propietats com són: la seva conformabilitat, soldabilitat conjuntament amb una elevada resistència a la corrosió i una bona capacitat d'absorbir energia. Per això, tot i tenint un important desavantatge com és el seu baix límit elàstic, aquests acers han despertat un gran interès i es presenten com a principals candidats per a la seva aplicació com a materials estructurals.

L'objectiu d'aquest projecte, és aconseguir millorar les propietats mecàniques superficials i microestructurals d'un acer inoxidable austenític metastable EN 1.4318, mitjançant un tractament superficial de brunyit. Una de les principals característiques d'aquest tipus d'acer, és la capacitat de transformar una fase austenítica a martensítica per una deformació plàstica. Per analitzar els efectes d'aquest tractament, s'han estudiat dues condicions inicials de l'acer, diferenciades segons el seu contingut de martensita. La primera mostra es troba en un estat de recuit, on el percentatge de martensita no supera l'1% i la segona prové directament del procés de laminació en fred, això comporta que aquesta presenti un 38% de martensita. Paral·lelament, en el mateix grup de recerca s'han estudiat dues mostres més, amb les quals compararem els resultats al llarg d'aquest treball, una d'elles presenta un 10% de fase martensítica inicial i l'altre té un contingut de martensita del 18%.

El tractament de brunyit s'ha dut a terme aplicant diferents condicions, les quals poden alterar els efectes produïts pel brunyit amb bola damunt la superfície. Aquestes condicions són l'assistència amb vibració o sense ella en l'eina de brunyir, la direcció en la que s'ha dut a terme el brunyit (paral·lela o perpendicular al laminat) i realitzar el procés en una o cinc passades. Les mostres tractades s'han caracteritzat a nivell superficial, mitjançant observació per microscòpia òptica confocal i SEM (microscòpia electrònica de rastreig). També, s'ha fet una caracterització mecànica efectuant mesures de la duresa en la secció transversal per indentació instrumentada.

Els resultats manifesten de manera clara, que s'assoleix una millora més significativa de les propietats mecàniques de la mostra en estat de recuit. A més, els resultats destaquen en aquelles condicions de brunyit en les que no s'aplica vibració a l'eina, es brunyeix amb cinc passades i en la direcció perpendicular al laminat.

RESUMEN

Los aceros inoxidables austeníticos metaestables forman parte de la familia de aceros de alta resistencia, los cuales presentan unas excelentes propiedades como son: su conformabilidad, soldabilidad conjuntamente con una elevada resistencia a la corrosión y una buena capacidad de absorber energía. Por este motivo, aún teniendo una importante desventaja como es su bajo límite elástico, estos aceros han despertado un gran interés y se presentan como principales candidatos para su aplicación como materiales estructurales.

El objetivo de este proyecto, es conseguir mejorar las propiedades mecánicas superficiales y microestructurales de un acero inoxidable austenítico metaestable EN 1.4318, mediante un tratamiento superficial de bruñido. Una de las principales características de este tipo de acero, es la capacidad de transformar una fase austenítica a martensítica por una deformación plástica. Para analizar los efectos de este tratamiento, se han estudiado dos condiciones iniciales del acero, diferenciadas según su contenido de martensita. La primera muestra se encuentra en un estado de recocido, donde el porcentaje de martensita no supera el 1% y la segunda proviene directamente del proceso de laminación en frío, esto conlleva que esta presente un 38% de martensita. Paralelamente, en el mismo grupo de investigación se han estudiado dos muestras más, con las cuales compararemos los resultados a lo largo de este trabajo, una de ellas presenta un 10% de fase martensítica inicial y la otra tiene un contenido de martensita del 18%.

El tratamiento de bruñido se ha realizado aplicando diferentes condiciones, las cuales pueden alterar los efectos producidos por el bruñido con bola encima de la superficie. Estas condiciones son la asistencia con vibración o sin ella en la herramienta de bruñir, la dirección en la que se ha llevado a cabo el bruñido (paralela o perpendicular al laminado) y realizar el proceso en una o cinco pasadas. Las muestras tratadas se han caracterizado a nivel superficial, mediante observación por microscopia óptica confocal y SEM (microscopia electrónica de rastreo). También, se ha realizado una caracterización mecánica efectuando medidas de la dureza en la sección transversal por indentación instrumentada.

Los resultados manifiestan de manera clara, que se logra una mejora más significativa de las propiedades mecánicas de la muestra en estado de recocido. Además, los resultados destacan en esas condiciones de bruñido en las que no se aplica vibración a la herramienta, se bruñe con cinco pasadas y en la dirección perpendicular al laminado.

ABSTRACT

The austenitic stainless metastable steels are part of the family of high resistance steels, which present a few excellent properties: its ductility, solderable together with a high resistance to the corrosion and a good aptitude to absorb energy. For this reason, still having an important disadvantage as its low flexible limit, these steels have woken up a big interest and present themselves as main candidates for its application as structural materials.

The aim of this project is trying to improve the superficial and microstructural mechanical properties of the stainlees austenitic metastable steel EN 1.4318, under a superficial burnish treatment. One of the main characteristics of this type of steel, is the ability to transform the austenite phase to martensite by plastic deformation. To analyze the effects of this treatment, they have been studied two initial conditions of this steel, differentiated according to its content of martensite. The first sample in annealed condition presents the percentage of martensita that does not overcome 1% and the following sample comes directly from the lamination process in cold, this involve in the second sample a 38% presence of matensite. In parallel, in the same group of investigation two more samples have been studied, which we will compare the results along this work, one sample presents a 10% of the initial matensite phase and another sample has a 18% content of matensite.

The burnish treatment has been realized applying different conditions, which can modify the effects produced by the ball burnish on the surface. These conditions are: the assistance with vibration or without in the tool, the direction in which the burnish has been done (parallel or perpendicular to the direction of lamination) and to make the process in one or five times. The treated samples have been characterized at superficial level, by means of observation with a confocal microscopy and SEM (scanning electronic microscopy). Also, mechanical properties are evaluated measuring hardness using instrumented indentation in transversal sections.

The results show in a clear way, that it is achieved, in annealed condition, a more significant progress of the mechanical properties in the sample. In addition, the results stand out in those burnish conditions in which vibration is not applied on the tool, it is burnished five times and in perpendicular direction of the lamination.

AGRAÏMENTS

Estic completament agraït amb els meus tutors del projecte , la Dra. Gemma Fargas i el Dr. Ramón Jerez, pels seus consells i coneixements que m'han aportat, així com pel seu suport, atenció i dedicació en tot moment. També vull donar les gràcies als tècnics de laboratori, Fernando García, Montserrat Domínguez i Trifon Todorov per la formació, els suggeriments i l'ajuda contribuïda en els equips emprats per a la realització del present projecte.

Agraeixo sincerament al meu amic, company projectista i aspirant a enginyer Eric Rodríguez per la companyia, el suport, els favors i l'ajuda al llarg de tot el projecte.

Vull donar les gràcies a l'EEBE per posar a la meva disposició les instal·lacions, els equips, el material i les persones professionals que han fet possible dur a terme aquest projecte.

Per últim, i no menys important, estic eternament agraït amb totes aquelles persones que m'han ajudat, recolzat i animat en algun moment del projecte.

Per tot plegat, a tots vosaltres, moltes gràcies.

CAPÍTOL 1:

INTRODUCCIÓ

1.1. Els Acers Inoxidables

Els acers inoxidables van aparèixer l'any 1865, quan van començar a fabricar-se per a casos particulars. Des de principis del segle XX la seva producció s'ha vist augmentada a nivell mundial, de tal manera que avui en dia s'han convertit en un dels acers més utilitzats i imprescindibles. Són exemple d'on es fa servir aquest tipus d'acer: la coberteria, la indústria química i la nuclear.

Aquests tipus d'acers es classifiquen dins de la família dels aliatges fèrrics, es constitueixen principalment per aliatges de ferro i carboni en una proporció d'aquest últim entre un 0,1 i un 2,1% en massa. L'addició d'altres elements d'aliatge implica canvis significatius en les propietats mecàniques, elèctriques, magnètiques i en la resistència a la corrosió del material.

Segons la normativa UNE-EN 10088, els acers inoxidables queden definits com aquells aliatges fèrrics que presenten un contingut mínim de crom del 10,5%. A més, també es caracteritzen perquè poden presentar altres elements d'aliatge com el manganès (Mn), níquel (Ni), silici (Si), molibdè (Mo) i titani (Ti), els quals aporten al material una millora en les propietats mecàniques i augmenten la resistència envers la corrosió.

L'elevada resistència a la corrosió és una de les principals avantatges d'aquest tipus d'acer, la qual ve donada per la capacitat que té el crom de reaccionar amb l'oxigen. Mitjançant la reacció, es forma una capa exterior d'òxid passiva que es torna a generar instantàniament quan aquesta es trenca, evitant d'aquesta manera la corrosió del ferro. La passivació d'aquests materials en un medi potencialment corrosiu es pot veure afavorida per altres elements d'aliatge com níquel o molibdè.

A continuació es pot observar en la corba de Tamman com l'augment del percentatge de crom en l'aliatge afavoreix una disminució de la pèrdua de pes en un medi corrosiu [1], (figura 1.1).

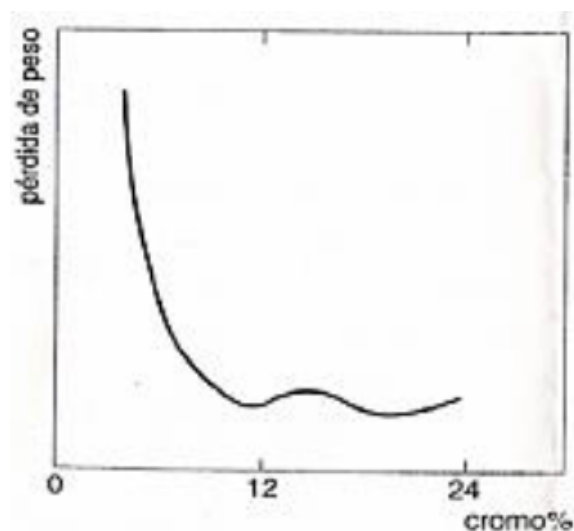


Figura 1.1. Representació corba de Tamman. ^[1]

La composició en massa de l'acer varia segons l'addició d'elements d'aliatge, per consegüent, obtenim un diagrama de fase amb un aspecte aparentment diferent a l'obtingut per al Fe-C [2], (figura 1.2). En referència a aquest últim diagrama, es pot observar com l'existència del ferro γ queda limitada pel crom que actua com element al·fagen, el qual afavoreix la presència de ferro α ; aquest fenomen es dona de manera contrària en el diagrama Fe-Ni.

L'addició d'elements d'aliatge implica modificacions considerables tot i que aquests estiguin presents en baixes proporcions. Segons la normativa europea EN 10020, els acers es classifiquen segons la seva composició química.

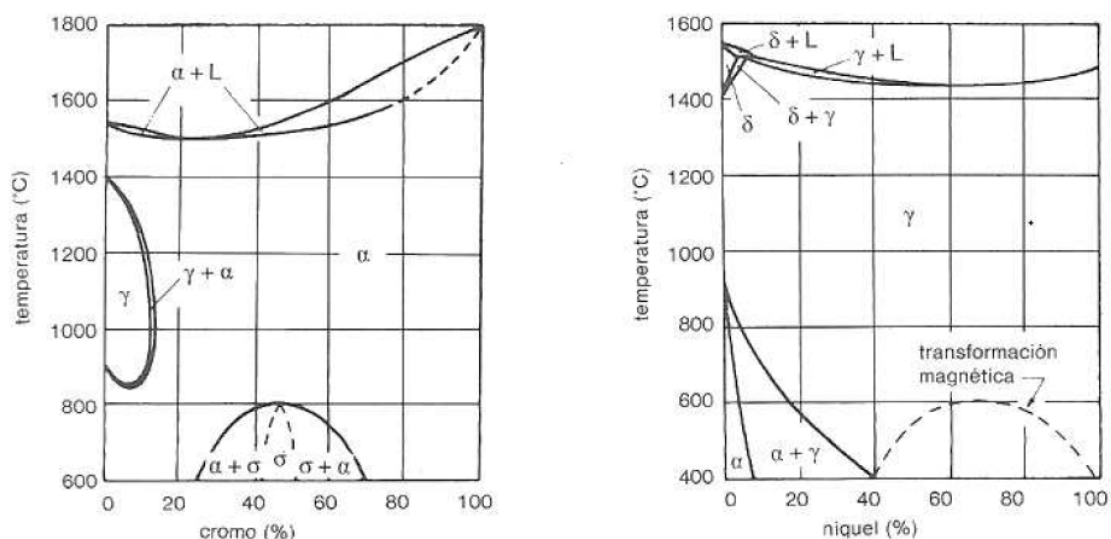


Figura 1.2. Diagrames Fe-Cr i Fe-Ni. ^[2]

1.1.1. Efecte i funció dels elements d'aliatge

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, les propietats dels diferents acers queden determinades pels elements d'aliatge i les seves proporcions que trobem en la composició química. Prèviament hem conegut alguns dels elements més utilitzats en els acers inoxidable, a continuació s'especifica l'efecte que originen cadascun d'ells en l'acer:

- El **Crom** (Cr) impulsa la creació d'una capa externa que protegeix l'acer de la corrosió. Aquesta, es forma a causa de la reacció del crom amb l'oxigen, amb un gruix d'1 a 2 nm. En proporció a l'increment de contingut de crom, la resistència a la corrosió augmenta. El crom també ajuda a evitar l'oxidació a altes temperatures i estabilitza l'estructura ferrítica.
- El **Manganès** (Mn) té la funció de desoxidar per tal d'evitar la formació d'inclusions de sulfurs, afavorint una major resistència a la ruptura a altes temperatures. A més, estabilitza l'austenita i el níquel.
- El **Níquel** (Ni) incrementa la tenacitat, la resistència en calent, la ductilitat i la soldabilitat, també aporta una òptima resistència a la corrosió en medis àcids. El níquel dóna estabilitat a la fase austenítica tal i com podem observar a la figura 1.2.
- El **Silici** (Si) impedeix la formació de carburs a altes temperatures i aporta una bona resistència a la corrosió.
- El **Molibdè** (Mo) afavoreix la formació de la capa passiva i redueix la tendència que té aquesta de trencar-se, d'aquesta manera augmenta la resistència a la corrosió per picadura. Aquest element també incrementa la resistència mecànica en calent dels acers austenítics.
- El **Titani** (Ti) té la funció d'estabilitzar l'acer. A més, aquest element té la capacitat de formar carburs de titani, els quals ajuden a evitar l'aparició de carburs de crom que causen una disminució de la resistència a la corrosió.

Més endavant, s'explicarà detalladament la influència que causen aquests elements d'aliatge i, d'altres que no s'han nombrat, en els acers inoxidable austenítics.

1.1.2. Classificació dels tipus d'acers inoxidables

Els acers inoxidables poden classificar-se en cinc categories diferents segons la seva microestructura cristal·lina i els tractaments termomecànics als que han estat sotmesos. En funció de la composició química de l'acer, principalment els percentatges de crom i de carboni, podem distingir els acers inoxidables ferrítics, martensítics, austenítics, dúplex i enduribles per precipitació. A continuació es descriu de forma resumida les seves principals característiques:

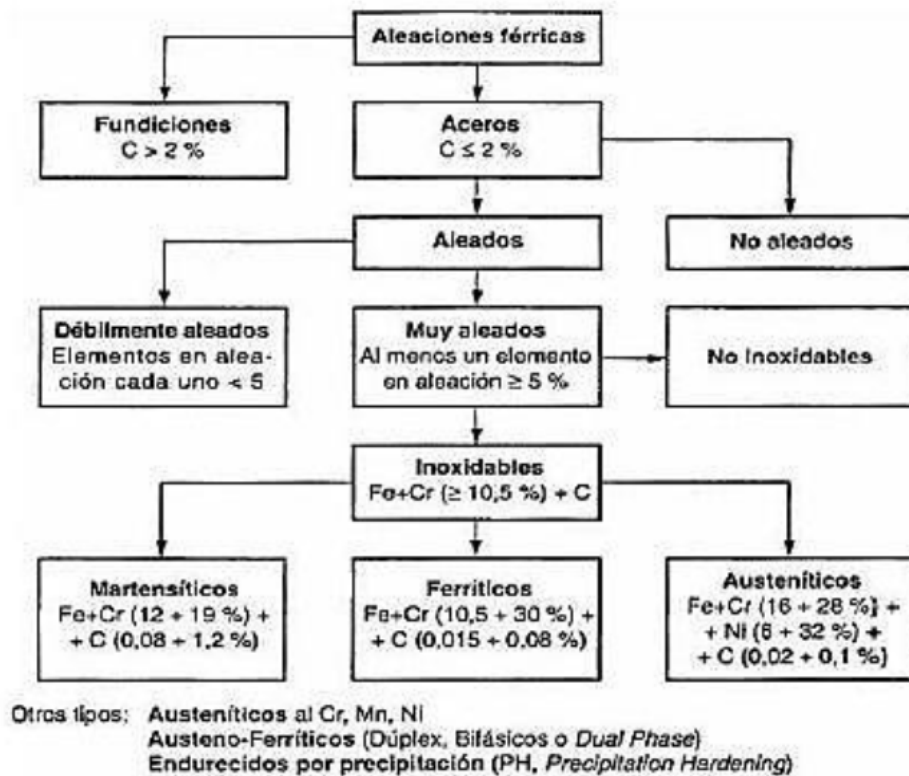


Figura 1.3. Classificació dels aliatges fèrrics. ^[3]

- Els **acers inoxidables ferrítics** presenten un baix contingut de carboni, inferior al 0,1%, que evita la formació de carburs en estat sòlid, donant com a resultat una disminució de la seva capacitat inoxidable. Per altra banda, el contingut de crom sol estar entre el 17 i el 25%, que aporta una millora en la resistència a la corrosió però empitjora la resistència a l'impacte. Les seves propietats mecàniques no es poden modificar mitjançant tractaments tèrmics, per poder augmentar la seva duresa és necessari aplicar deformació en fred. A més, alguns acers ferrítics presenten estructures bifàsiques, per aquesta raó, poden estar sotmesos lleugerament a un enduriment parcial per tremp. Els acers inoxidables ferrítics són magnètics, amb una baixa tenacitat i mediocre soldabilitat. Aquests acers els podem trobar en electrodomèstics, vaixella metàl·lica, intercanviadors de calor o silenciadors de tubs d'escapament.

- Els **acers inoxidables martensítics** tenen un contingut de carboni de 0,1 a 0,5% i de crom entre l'11 i el 18%. Amb aquests percentatges són capaços d'augmentar la seva duresa, resistència i resistència a la corrosió si se'ls tracta tèrmicament, mitjançant l'escalfament de l'acer a altes temperatures per a l'obtenció d'una estructura austenítica i refredant-lo sobtadament mitjançant tremp per obtenir una estructura martensítica. Per aconseguir major duresa, així com una millor resistència mecànica, és necessari augmentar el contingut de crom de l'acer. Els acers inoxidables martensítics resulten ser més resistents en comparació amb els acers inoxidables ferrítics, en canvi, la seva resistència a la corrosió és pitjor degut a l'estructura martensítica obtinguda pel trempat i a l'aparició d'una gran quantitat de carburs posteriorment al revingut. Aquests acers s'utilitzen, per exemple, en àleps de turbines, instruments odontològics i quirúrgics, eixos per a bombes d'aigua, vàlvules, cargols i eines inoxidables de duresa moderada com són: ganivets, tornavisos, estisores, etc.
- Els **acers inoxidables austenítics** presenten un contingut de crom entre el 16 i el 26%, mentre que el percentatge de carboni generalment no supera el 0,1%, exceptuant alguns casos on el seu contingut pot incrementar fins al 0,25%. El baix contingut de carboni evita la formació de carburs que perjudiquen a la resistència a corrosió. Aquests acers tenen millor resistència a la tenacitat i a la corrosió que els esmentats anteriorment, a més, no són magnètics i són els més comuns comercialment. Es poden diferenciar en dos grups: els de crom-níquel i els de crom-manganès-níquel. El primer grup comprèn la majoria d'acers inoxidables que s'utilitzen normalment, tenen uns continguts de carboni entre el 0,03 i el 0,25%, de crom del 17 al 26% i de níquel entre el 7 i el 22%. La presència de níquel implica que l'estructura no es pot transformar mitjançant un tractament tèrmic, així doncs, aplicant treball en fred s'obté martensita que afavoreix l'augment de la duresa i la conservació d'una bona ductilitat. Les principals aplicacions d'aquests acers es troben en la indústria alimentària, farmacèutica o química.
- Els **acers inoxidables dúplex** són una combinació d'austenita i ferrita que es presenten aproximadament en proporcions iguals, formant una microestructura mixta, amb un contingut mínim de crom del 16% i un percentatge de níquel entre el 4 i el 7%. Es tracta d'una matriu de ferrita on hi trobem l'austenita dispersa. El contingut de carboni és inferior al 0,7%. Aquests acers tenen millor soldabilitat i resistència a la corrosió per picadura que els ferrítics, també presenten una resistència a la corrosió sota tensions i a la termofluència més elevada que els austenítics. En general és un tipus d'acer difícil de conformar i s'endureix mitjançant treball en fred, tot i això, s'aconsegueixen resistències mecàniques més elevades. La bona resistència a la corrosió que presenten en ambients

fortament àcids, permet utilitzar els acers dúplex en aplicacions amb entorns marins. A més, tenen importants aplicacions en la indústria petroquímica, alimentària, paperera i estructural en presència d'ions de clor.

- Els **acers inoxidable enduribles per precipitació** o PH (Precipitation Hardening), reben aquest nom ja que al tractar-los tèrmicament mitjançant processos d'envelliment, els elements d'aliatge (alumini, titani, molibdè o coure) precipiten en compostos intermetàl·lics que produeixen l'enduriment, aconseguint un augment important en la resistència al desgast i la duresa. Aquests poden ser martensítics, semiaustenítics o austenítics. Són fàcils de mecanitzar tot i presentar dificultats a l'hora de ser treballats en fred. A més, presenten una resistència a la corrosió òptima quan es sotmet el material a sol·licitacions estàtiques i/o dinàmiques. Principalment s'utilitzen en la indústria aeroespacial i d'alta tecnologia.

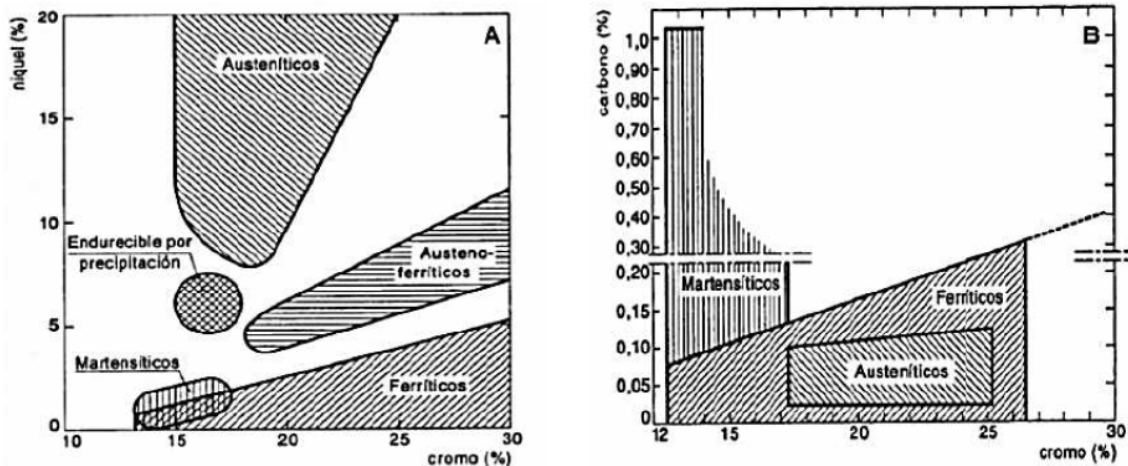


Figura 1.4. Tipologia d'acers inoxidable en funció a les concentracions de crom-níquel (esquerra) i crom-carboni (dreta). [2]

1.1.3. Nomenclatura

En general, la nomenclatura dels acers no està del tot normalitzada, a causa de que els països i institucions que es dediquen a la fabricació i l'ús d'acers, poden fer servir una denominació particular i diferent en cada cas per nomenar un mateix acer.

Si ens limitem a observar el sistema americà, trobem rellevants la influència de diferents institucions com: ASTM (American Society for Testing and Materials), AISI (American Iron and Steel Institute), ASME (American Society of Mechanical Engineers), SAE (Society of Automotive Engineers), etc. [5]

Segons les institucions AISI i SAE, la nomenclatura dels acers es divideix en sèrie 200 si són austenítics al crom-manganès-níquel, en sèrie 300 els austenítics al crom-níquel i en sèrie 400 els ferrítics i martensítics. Pels acers dúplex i enduribles per precipitació es fa servir el seu nom comercial.

1.2. Els Acers Inoxidables Austenítics

Els acers inoxidables austenítics presenten una estructura cristal·lina cúbica centrada a les cares, això implica que no tinguin propietats magnètiques i per tant, es poden distingir fàcilment dels acers ferrítics i martensítics mitjançant l'aplicació d'un imant.

Principalment es diferencien dels altres acers per la seva composició química, degut a que la presència d'una quantitat suficient de níquel en aquests aliatges ens permet obtenir l'acer inoxidable austenític, el qual aconsegueix conservar l'estructura gamma a temperatura ambient.

Aquests tipus d'acers tenen un comportament molt òptim a elevades temperatures, degut a que la seva estructura cristal·lina es manté estable en un rang de temperatures força ample. A més, com a conseqüència d'aquesta estructura, el seu allargament a ruptura es veu afavorit i supera al dels acers inoxidables ferrítics o martensítics. Per altra banda, posseeixen una tenacitat elevada donat que la seva temperatura de transició dúctil/fràgil és de l'ordre de -200°C.

Els acers inoxidables austenítics no presenten transformacions al·lotròpiques, per consegüent, no és possible afinar la seva mida de gra per tractament tèrmic. Tot i això, a diferència dels acers inoxidables ferrítics, la tenacitat d'aquests acers gairebé no es veu compromesa amb una mida de gra gran. [1]

1.2.1. Composició química

La metal·lúrgia física dels acers inoxidables austenítics és complexa, degut a una gran quantitat d'elements i fases d'aliatge. Aquests tenen una ampla gama de composicions químiques que exerceixen una gran influència en l'estructura metal·lúrgica de l'acer, les propietats físiques, mecàniques i la resistència a la corrosió del material.

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, els acers inoxidables austenítics són majoritàriament aliatges Fe-Cr-Ni, tot i així, poden tenir presència altres elements que afavoreixen la variació de les seves propietats, com és el cas del molibdè i altres elements que seran nomenats posteriorment.

La classificació dels elements d'aliatge es basa en funció de l'aportació a l'estabilització de les fases austenítiques (gammàgens) i martensítiques (alfàgens). Els elements alfàgens reben aquest nom ja que donen pas a la formació d'una estructura cúbica centrada en el cos (BCC), en canvi, els anomenats gammàgens afavoreixen una xarxa cristal·lina FCC.

La presència de carboni en els acers inoxidables austenítics és gairebé nul·la, normalment aquests contenen un percentatge de carboni inferior al 0,1%, mentre que els continguts de crom i níquel oscil·len entre 16-26% i 7-25%, respectivament. Els elements d'aliatge es divideixen en estabilitzadors de ferrita o austenita, on el crom és un estabilitzador de ferrita mentre que el níquel estabilitza l'austenita.

En el present projecte s'estudia l'acer AISI 301LN, que segons la seva composició forma part del grup d'acers inoxidables austenítics metastables.

Els acers inoxidables austenítics metastables com el 301, es pot veure la seva composició química detallada a la taula 1.1, tenen molt bona ductilitat i s'utilitzen en aplicacions que requereixen una bona deformabilitat. L'acer 301 es caracteritza per tenir un major contingut de carboni ($\leq 0,15\%$) que la resta dels acers inoxidables austenítics, per la qual cosa li proporciona millors característiques mecàniques, però provoca una disminució de la resistència a la corrosió. El contingut de níquel és el menor entre els inoxidables austenítics (6-9,5 %). Aquest té un elevat enduriment per deformació i s'obté una alta resistència mecànica en estat de laminat en fred. [6]

AISI	%C	%Si	%Mn	%P _{max}	%S	%N	%Cr	%Mo	%Ni
301	0,05 - 0,15	≤ 2	≤ 2	0,045	$\leq 0,015$	$\leq 0,11$	16-19	$\leq 0,8$	6-9,5
301LN	$\leq 0,03$	≤ 1	≤ 2	0,045	$\leq 0,015$	0,10-0,20	16,5-18,5	-	6-8
304	$\leq 0,07$	≤ 1	≤ 2	0,045	$\leq 0,015$	$\leq 0,11$	17-19,5	-	8-10,5
304LN	$\leq 0,03$	≤ 1	≤ 2	0,045	$\leq 0,015$	0,12-0,22	17-19,5	-	8,5-11,5
316	$\leq 0,07$	≤ 1	≤ 2	0,045	$\leq 0,015$	$\leq 0,11$	16,5-18,5	2-2,5	10-13
316LN	$\leq 0,03$	≤ 1	≤ 2	0,045	$\leq 0,015$	0,12-0,22	16,5-18,5	2,5-3	11-14

Taula 1.1. Composició química d'alguns acers inoxidables austenítics. ^[4]

1.2.2. Els elements d'aliatge i la seva influència

Avui en dia es poden desenvolupar acers que compleixin condicions específiques depenent de la seva aplicació i de les condicions de fabricació d'aquest, això és possible gràcies a la influència aïllada o combinada dels diferents elements d'aliatge que provoca modificacions en les propietats de l'acer.

En els acers inoxidable trobem dos elements d'aliatge essencials: el crom i el níquel. També, s'utilitzen altres elements amb l'objectiu d'incrementar la resistència a la corrosió per medi humit o millorar la resistència a l'oxidació en altes temperatures, per exemple: el silici, el molibdè, el titani, el niobi, el manganès, el tungstè i el nitrogen.

Podem classificar els elements d'aliatge en dos grups diferents, els "alfàgens" que estableixen la ferrita (fase α) i els "gammàgens" que estableixen l'austenita (fase γ).

ELEMENTS ALFÀGENS

- El **Crom** (Cr) és l'element primordial dels acers inoxidable, la principal funció d'aquest element consisteix en formar una fina capa d'òxid sobre la superfície de l'acer, la qual és insoluble, impermeable i homogènia en medis corrosius quan el percentatge d'aquest element és superior al 10,5%. El crom afavoreix l'augment del camp d'existència del ferro alfa i disminueix el del ferro gamma, estabilitzant l'estructura ferrítica, és per això que forma part del grup d'elements alfàgens.
- El **Silici** (Si) incrementa la resistència dels acers enfront l'oxigen, l'aire i els gasos oxidants calents, per aquest motiu és un element molt utilitzat en els aliatges resistents a altes temperatures. En comparació amb el crom, la influència que té aquest element en disminuir la superfície gamma és més elevada.
- El **Molibdè** (Mo) té una gran influència sobre la passivitat i la resistència química dels acers inoxidable enfront la presència d'àcids reductors i d'ions clor, contrarestant en aquestes situacions la inestabilitat de la passivitat del crom. Augmenta la resistència a la corrosió per picadura. També és un element que afavoreix la resistència mecànica en calent dels acers austenítics.
- El **Titani** (Ti) i el **Niobi** (Nb) desenvolupen una funció concreta en els acers inoxidable austenítics, aquesta és la d'estabilitzar l'acer. L'objectiu principal d'aquests elements és impedir que precipitin carburs de crom durant refredaments lents o escalfaments de llarga durada a temperatures properes als 700°C, per tant, s'impedeix la reducció local del contingut de crom en l'acer. La pèrdua de contingut de crom podria provocar una disminució de la resistència a la corrosió.

ELEMENTS GAMMÀGENS

- El **Níquel** (Ni) té la capacitat d'incrementar la resistència a la corrosió en medis lleugerament oxidants. La presència d'aquest element produeix una modificació en l'estructura de l'acer i permet obtenir aliatges amb millors propietats de soldabilitat, ductilitat i resistència mecànica en calent. A diferència del crom, el

níquel és un element gammàgen que dóna estabilitat a la fase austenítica. A més, aquest element augmenta la capacitat de trempat dels acers com a resultat de disminuir la velocitat crítica de refredament.

- El **Carboni** (C) és un element gammàgen que afavoreix una ampliació important del camp d'estabilitat de l'austenita en aliatges ferro-crom. Tot i això, la resistència a la corrosió es pot veure afectada amb la formació de carburs de crom, per tant el carboni es presenta en petites quantitats en els acers inoxidable austenítics.
- El **Nitrogen** (N) és un element que es presenta en acers al crom o al crom-níquel de manera similar al carboni, degut a que es tracta d'un element gammàgen. Aquest augmenta la resistència de la corrosió localitzada com la corrosió intergranular. L'addició de nitrogen incrementa la resistència mecànica, això es realitza especialment en aliatges amb baix contingut de carboni amb l'objectiu d'augmentar el límit elàstic del material.

1.2.3. Microestructura

La microestructura dels acers inoxidable austenítics pot ser complexa. Es porta a cap un trempat sobre aquests acers amb la finalitat d'impedir la precipitació de fases no desitjables. Aquest procés genera una estructura austenítica amb poca densitat de dislocacions. Els defectes d'apilament es formen amb gran facilitat a causa de la baixa energia de defectes per apilament (SFE) dels acers inoxidable austenítics. Tanmateix, molts carburs i fases intermetàl·liques poden estar presents i l'austenita es pot transformar parcialment en dos tipus diferents de martensita si s'indueix deformació. [7]

1.2.4. Propietats físiques i mecàniques

PROPIETATS FÍSQUES

En general, els acers inoxidable austenítics tenen baixa conductivitat tèrmica, alta expansió tèrmica i alta resistivitat elèctrica. Els elements d'aliatge tenen un efecte molt important en aquestes propietats. Un bon exemple d'això són el níquel (Ni), coure (Cu) i crom (Cr) disminueixen la conductivitat tèrmica, per altra banda, el níquel i coure poden disminuir l'expansió tèrmica.

En la següent taula es troba de manera resumida algunes propietats físiques dels acers inoxidable austenítics:

Propietats	Valors
Densitat	7,9-8,2 g/cm ³
Mòdul de Young	193 GPa
Expansió tèrmica	17-19 µm/mK
Conductivitat tèrmica	12-15 W/mK
Resistivitat elèctrica	750 nΩm
Punt de fusió	1370-1430 °C

Taula 1.2. *Propietats dels acers inoxidable austenítics.* [8]

Tenint com a referència l'anterior taula, a continuació s'enumeren breus comparacions amb altres tipus d'acers dels valors d'algunes propietats específiques.

El *punt de fusió* és inferior, si el comparem amb els acers ferrítics al crom, degut a la presència del níquel. En els acers inoxidable austenítics una addició del 2% o 3% de silici provoca una disminució del punt de fusió.

El *coeficient d'expansió tèrmica* és superior que el dels acers martensítics o ferrítics.

La *densitat*, la *resistivitat elèctrica* i la *conductivitat tèrmica* són valors semblants als dels diferents acers d'aquest tipus. [3]

PROPIETATS MECÀNIQUES

Els acers inoxidable austenítics tenen generalment una ductilitat i duresa elevada, a més, mantenen la seva resistència mecànica a altes temperatures. En canvi, les propietats de tracció difereixen segons el tipus d'acer inoxidable austenític.

La transformació martensítica induïda per deformació afecta directament a les propietats de tensió i de manera diferent segons el tipus d'acer inoxidable. Pel que fa als elements d'aliatge, especialment els intersticials com el carboni i el nitrogen, incrementen l'enduriment per solució sòlida, això fa que augmenti el límit elàstic d'aquests acers aliats. No obstant, els acers inoxidable amb un alt contingut d'elements d'aliatge generen un grau més estable, amb menys o sense transformació martensítica. La transformació martensítica de les qualitats metastables induïx un efecte elevat d'enduriment per deformació, augmentant la resistència a tracció. [7]

En la taula 1.3 es mostren les propietats mecàniques dels acers inoxidable austenítics en estat de recuit amb un contingut de carboni comprés entre 0,05-0,10%:

<i>Propietats</i>	<i>Valors</i>
Duresa HB_{max}	241
Límit elàstic R_{p0,2}	330 MPa
Resistència a tracció R_m	650-830 MPa
Elongació	45 %

Taula 1.3. Propietats mecàniques de l'EN 1.4318. ^[4]

1.3. Els Acers Inoxidables Austenítics Metastables

Els acers inoxidable austenítics metastables es classifiquen dins de la família d'acers inoxidable austenítics. Aquests tenen bona resistència a la corrosió i bones propietats mecàniques, a més, no presenten punts de transformació. Per consegüent, no poden transformar a martensita mitjançant un tremp, sinó que es caracteritzen per transformar l'austenita a martensita per deformació. Aquest comportament tan sols s'observa en acers austenítics amb un baix percentatge d'elements d'aliatge.

Aquest tipus d'acer manté la seva estructura austenítica en estat de recuit, però es transforma parcialment a martensita durant la deformació. Com ja sabem, la martensita és una fase més dura i resistent que l'austenita. La transformació d'una fase a l'altra crea una estructura de material compost que provoca un efecte d'enduriment per deformació, això fa que es proporcioni una elevada resistència mecànica després del treball en fred.

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, aquest mecanisme es dona en acers amb un percentatge d'elements d'aliatge menor en comparació amb els acers que es classifiquen dins del mateix grup atès que, en general, un augment dels elements d'aliatge implica un increment en el percentatge de níquel i nitrogen. Ambdós elements presenten propietats gammàgenes de manera que contribueixen a estabilitzar la fase gamma de l'acer, és a dir, l'austenita.

En el contingut d'un acer inoxidable austenític coexisteixen diferents elements i per consegüent la seva estructura és funció de la suma de les seves aportacions respectives. Schaeffler estableix en un diagrama la influència dels elements al·fàgens i gammàgens en la formació dels diversos tipus d'acers inoxidable. Aquest diagrama considera els elements al·fàgens en crom equivalent (Cr_{eq}) i en níquel equivalent (Ni_{eq}) per als elements gammàgens. Aquests valors es calculen de la següent manera:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb \quad (\text{Eq. 1.1})$$

$$Ni_{eq} = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn \quad (\text{Eq. 1.2})$$

En el diagrama de Schaeffler (figura 1.5) es pot observar que els acers austenítics de baix aliatge es troben entre la cantonada inferior i superior esquerra. Aquesta zona està prop de la regió martensítica i són anomenats acers inoxidable austenítics metastables, degut a la susceptibilitat que tenen per transformar a martensita sota l'acció d'una deformació. En canvi, els acers austenítics altament aliats són més estables i no transformen en martensita durant la deformació. [7]

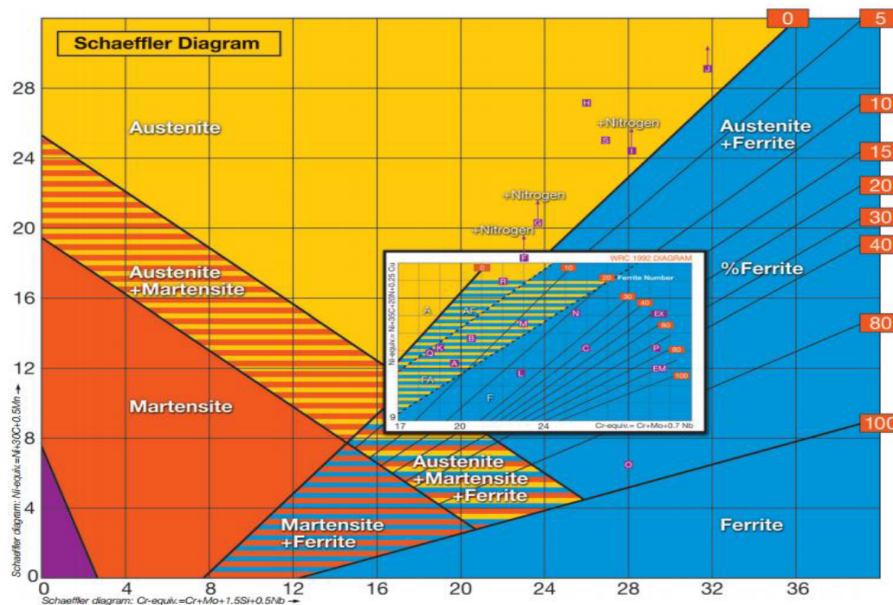


Figura 1.5. Diagrama de Schaeffler. [3]

La transformació d'austenita a martensita pot tenir un efecte beneficiós així com també perjudicial sobre la resistència a la fatiga, ja que depenent de la quantitat d'austenita transformada durant el conformat les propietats poden canviar significativament. Aquest és un dels majors inconvenients d'un acer inoxidable austenític metastable, degut a que dificulta la predicció del seu comportament mecànic. Per això, és molt important tenir coneixements profunds d'aquesta transformació a fase martensítica i estimar la quantitat de martensita que s'ha format, d'aquesta manera es podrà conèixer la seva resposta mecànica durant el servei. Les eines utilitzades per determinar el grau de transformació que té lloc són: la difracció de raigs-X, la microscòpia electrònica de rastreig (Scanning Electron Microscopy – SEM) i la microscòpia electrònica de transmissió (Transmission Electron Microscopy – TEM).

Avui en dia aquests acers metastables s'utilitzen principalment en aplicacions que requereixen moltes operacions de conformat o processos de deformació severs, gràcies a la seva excel·lent ductilitat i conformabilitat. També estan guanyant més interès degut a la combinació de la seva gran deformabilitat i la seva elevada resistència després del conformat. A més, existeix una forta competència entre les empreses automobilístiques que obliga al desenvolupament de vehicles més lleugers, a fi de complir les normatives exigents de qualitat, reducció d'emissions, seguretat i comoditat. La necessitat de millora

tecnològica en el sector del transport, tant per l'automòbil com per trens, autobusos i camions, requereix d'una evolució per part dels fabricant d'acers de nous aliatges amb elevada resistència mecànica. Els principals candidats que destaquen entre els demés són els acers inoxidable austenítics metastables, perquè presenten un fort enduriment que permet emprar espessors de xapa menors arribant a reduccions de pes del 40%.

L'acer inoxidable austenític metastable AISI 301LN, material que s'estudia en el present projecte, és un clar exemple que es caracteritza per tenir bona ductilitat i conformabilitat. Ara bé, aquest presenta un enduriment per deformació extrema, la qual afavoreix un increment del límit elàstic i la resistència mecànica, provocant un agreujament en la ductilitat.

1.4. Transformació Martensítica

La martensita es caracteritza per l'elevada duresa i resistència mecànica que presenta, així com una gran resistència al desgast, malgrat tot, és fràgil i poc tenaç. Es tracta d'una solució sòlida sobresaturada de carboni en ferro α , que s'obté normalment per un refredament molt ràpid en acers, posteriorment a un augment de la temperatura fins al punt d'aconseguir fase austenítica, i que es produeix a causa d'un moviment per cisalla de la xarxa cristal·lina. Es produeix una reorganització dels àtoms, sense difusió, per acabar formant una estructura més estable. És un canvi de fase en estat sòlid que conserva l'ordre i la composició química de la fase austenítica.

L'austenita manté una estructura cúbica centrada en les cares (FCC) i pot transformar a martensita donant lloc a dos possibles resultats: transformant en una estructura hexagonal compacta (HCP) anomenada ϵ -martensita, que té propietats paramagnètiques, és a dir, que es veu atreta per un camp magnètic sense quedar-se magnetitzada; o en una estructura cúbica centrada en el cos (BCC) anomenada α' -martensita, que és ferromagnètica.

Pel que fa a la martensita ϵ , aquesta comença a formar-se a l'inici de la deformació plàstica fins arribar a un punt on la seva fracció de volum disminueix. En canvi, la martensita α' comença a formar-se, de la mateixa manera que ho fa la ϵ , a l'inici de la deformació plàstica, però a diferència de l'anterior, segueix formant-se progressivament fins trobar-se com a l'únic tipus de martensita present al material. Això es dona arran de que la martensita α' es pot obtenir de l'austenita metastable o de la martensita ϵ , aquesta última és inestable i pot acabar transformant tal i com es pot observar a la figura 1.6. [9]

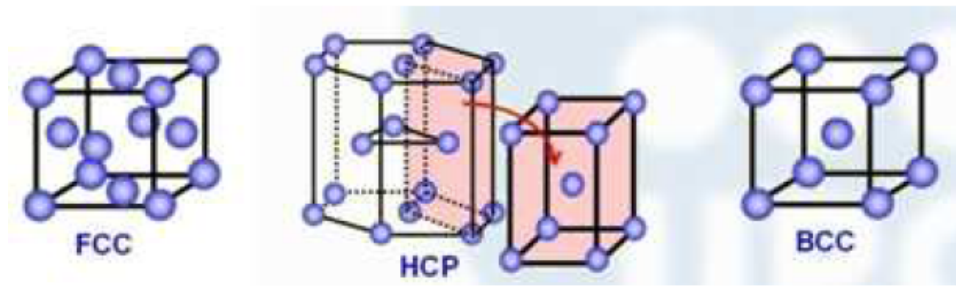


Figura 1.6. Estructures cristal·lines de la martensita. D'esquerra a dreta: Austenita- γ ; Martensita- ϵ ; Martensita- α' ^[9]

La martensita es manifesta en forma acicular i en una estructuració de zig-zag, aquesta cristal·litza en la xarxa tetragonal en comptes de fer-ho en la cúbica centrada pròpia del ferro α , perquè es produeix una deformació de la seva xarxa cristal·lina causada per la inserció dels àtoms de carboni.

Quan el creixement de la martensita topa amb un límit de gra o una altra placa de martensita, aquest es veu interromput i s'atura (figura 1.7). Així doncs, tots aquells grans que tinguin mides més amples permeten la formació de plaques de martensita més grans. Aquestes plaques apareixen amb una velocitat molt elevada, i en algunes ocasions l'aparició d'una placa indueix a la formació d'altres de contigües degut a les tensions internes que es creen.



Figura 1.7. Martensita formada dins els grans d'austenita amb estructura en forma acicular. ^[10]

El procés de transformació d'austenita a martensita es defineix com una modificació estructural en estat sòlid sense presentar difusió d'espècies químiques, que està dominada cinètica i morfològicament per l'energia que prové dels desplaçaments per cisalla. Es tracta d'un moviment cooperatiu dels àtoms que es desplacen mitjançant moviments de cisalla, mantenint la seva composició química i ordenació dins el pla de desplaçament.

El desplaçament dels àtoms durant una transformació martensítica es representa a la figura 1.8. On es pot observar les noves posicions dels àtoms (punts negres) i les posicions originals (punts blancs). La traça del pla límit separa la xarxa original no transformada de la transformació d'una regió que canvia d'orientació, sense variar la posició original dels àtoms. Aquest desplaçament dóna lloc a un efecte de relleu en la superfície del metall. Si la superfície presenta ratlles fines degut al polit, la formació de la plaqueta martensítica crea una deflexió d'aquestes ratlles. [10]

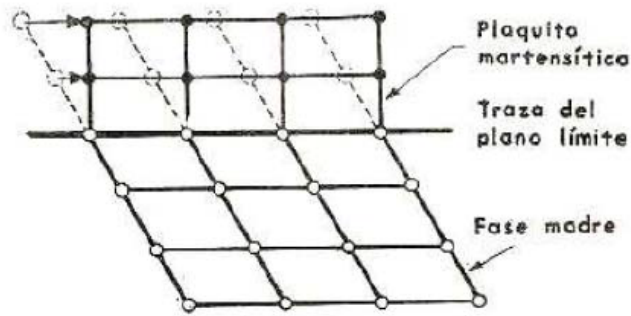


Figura 1.8. Representació esquemàtica del desplaçament dels àtoms en la formació d'una placa martensítica. ^[10]

També es produeixen altres desplaçaments durant la transformació que no contribueixen a la mateixa. Aquests, tenen com a objectiu alliberar l'energia de la deformació mitjançant lliscaments o maclats, anomenats invariants cristal·lins ja que no afecten a la nova estructura generada per la deformació com s'observa a la figura 1.9.

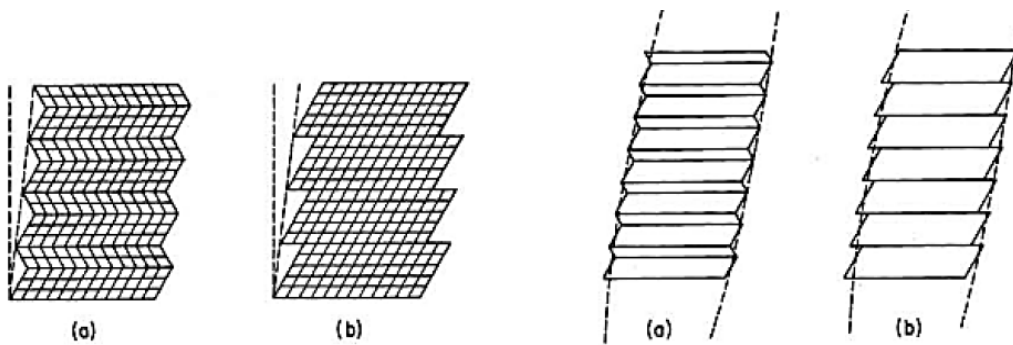


Figura 1.9. Deformació per cisalla seguint mecanismes de maclat (a) i de lliscament (b) sense variar l'estructura cristal·lina. ^[13]

Tal i com s'ha comentat anteriorment, la transformació martensítica succeeix sense difusió, això implica que la martensita conserva la mateixa composició ja que no hi ha una combinació aleatòria d'àtoms durant el canvi estructural. També es manté l'ordre atòmic així com els mateixos defectes cristal·lins presents a l'austenita original. En efecte, aquesta transformació no necessita difusió tèrmicament activada, per tant, la gran majoria succeeixen a temperatures molt baixes.

Sobre la cinètica de la transformació martensítica, normalment depèn de la velocitat de nucleació. Aquest procés es considera atèrmic, tenint en compte que com més baixa és la temperatura més nuclis es formen. A causa de la naturalesa no difusiva del procés, els canvis de forma i volum associats a les modificacions de l'estructura cristal·lina comporten deformacions. L'increment de l'energia de deformació frena el progrés de la transformació de les fases, arribant a parar-la quan encara és incompleta. De manera que, únicament uns quants nuclis s'activen a una temperatura específica.

Per originar més transformacions es necessari un esforç conductor major, aquest s'aconsegueix amb un refredament més violent o amb una sol·licitació mecànica si fos el cas dels metaestables. Així doncs, podem obtenir martensita mitjançant un tractament tèrmic de tremp o bé, mitjançant deformació en fred.

Quan l'acer es refreda, el canvi de fase s'inicia a una temperatura característica M_s (martensite start) i finalitza en arribar a la temperatura M_f (martensite finish). Tot i això, la transformació pot començar a una temperatura diferent M_d en cas d'haver-hi presència d'una deformació aplicada, sigui elàstica o plàstica.

Aquestes transformacions martensítics mostren determinats patrons de comportaments geomètrics relacionats entre si, amb els quals s'ha formulat una teoria cristal·logràfica molt completa que explica tots els fenòmens descrits anteriorment, com es el cas del maclat o el lliscament de plans. La teoria diferencia tres etapes:

- I. **Deformació de Bain:** Es tracta de qualsevol deformació pura homogènia que converteix una xarxa en una altra per efecte de la tracció i compressió a través dels eixos ortogonals, transformant d'aquesta manera la cel·la unitat. En el model de Bain s'argumenta que una xarxa FCC es pot considerar com una BCT si s'aïlla una estructura BCT entremig de dos FCC, tal i com es pot observar a la figura 1.10.

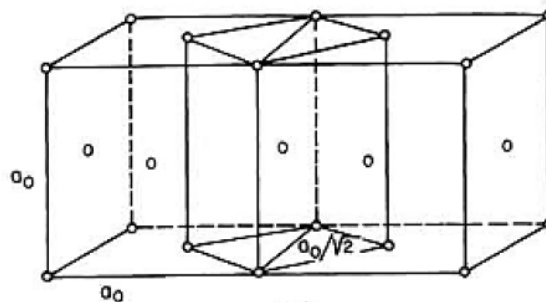


Figura 1.10. Estructura BCT entremig de dos estructures FCC. ^[11]

La deformació de Bain, com ja s'ha esmentat, es genera per la tracció i compressió de la xarxa amb la condició que les línies romanguin rectes i els plans com a tal. Aïllant l'estructura BCT s'observa que aquesta no té les dimensions correctes de la

cel·la unitària de la martensita; per tant, mitjançant una variació en la longitud dels eixos, produïda per la deformació, transforma a BCC i s'obté les dimensions correctes de l'estructura cristal·lina (figura 1.11). Aquest tipus de deformació es coneix com a deformació homogènia de retícula. [12]

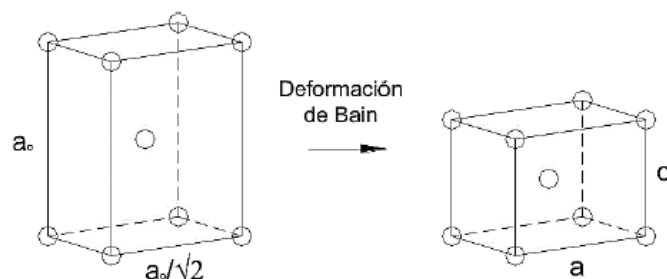


Figura 1.11. Representació esquemàtica de la deformació de Bain de BCT a BCC [12]

- II. **Deformació invariant de la xarxa:** Aquesta deformació conserva la simetria de la xarxa, en combinació amb les deformacions de Bain es considera que existeixen diferents tipus de desplaçaments atòmics, en bloc, que no produeixen canvi en la posició relativa entre els àtoms y tenen la capacitat de mantenir un pla sense distorsió ni rotació. El pla conservat es coneix com a pla invariant. Aquesta deformació és un cisallament que pot ocórrer o bé per lliscament o per maclat, tal i com s'explica prèviament i es pot veure a la figura 1.9 i 1.12. Els desajustos en la interfase origen/producte són mitigats periòdicament per les petites làmines lliscades o maclades. Així doncs, les regions locals dels plans de lliscament presenten alternativament extensions i contraccions, però a escala macroscòpica no s'observa distorsió.
- III. **Rotació de la xarxa transformada:** El pla sense distorsió difereix en orientació entre les fases, en conseqüència de les deformacions de Bain i invariant. Per aquest motiu s'ha de realitzar una rotació de l'estructura de la fase producte, amb la finalitat d'assegurar la coincidència.

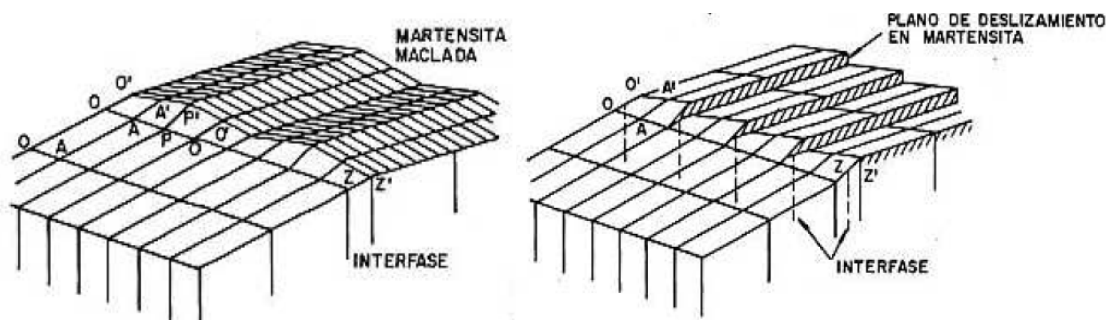


Figura 1.12. Representació de la martensita maclada i lliscada, respecte la fase original. [13]

Les transformacions martensítiques es caracteritzen per tenir un pla de comportament que generalment no té índex de Miller simples, i per una relació d'orientació en la que els plans i direccions de màxim empaquetament en ambdues fases (austenita i martensita) són aproximadament paral·lels. [13][14][15]

1.4.1. Transformació martensítica mitjançant un tremp

El procés de tremp es caracteritza per l'escalfament d'una peça a una determinada temperatura que posteriorment es refredarà abruptament. Pel que fa a l'acer, s'escalfa a una temperatura superior a la d'austenització, la qual pot variar segons la composició química de l'acer, durant el temps necessari per obtenir tots els cristalls que componen la massa de l'acer transformats en austenita. Aquesta és l'única estructura d'aquest material amb la capacitat de transformar a martensita quan es refreda ràpidament, a més, presenta la màxima duresa. Així doncs, quan es té la seguretat que la transformació de fase s'ha completat, la peça es submergeix en un medi a temperatura ambient o inferior, depenent de les condicions de tremp, causant la transformació de l'austenita a martensita.

A primera instància pot semblar que es tracta d'un procés senzill, però, és una tècnica molt estudiada amb alguns factors clau que incideixen significativament en l'acer que resulta com a producte. Els factors que tenen més rellevància són el temps, les dimensions de la peça, la mida de gra, el medi de refredament i la concentració de carboni tant en la superfície com a l'interior. Aquests mateixos influeixen directament a les propietats dels acers trempats i la quantitat de martensita transformada:

- El **temps** és un dels factors més importants durant el tremp, ja que depenent de la temperatura i el temps que es triga a realitzar el tremp, el material pot viatjar a través dels diagrames TTT segons el nostre interès, de manera que ens permet obtenir l'estructura desitjada.
- Les **dimensions de la peça** implica tenir en compte la velocitat de conducció de la temperatura, a mesura que les peces són més grans es necessita més temps per incrementar la temperatura en l'interior, donat que trigarà més a austenitzar-se i per tant a transformar. En el refredament succeeix el mateix, l'interior de la peça es refreda més lentament que la superfície. Això pot derivar en l'obtenció de productes no desitjats degut a un tremp massa lent, el qual ha de ser ràpid perquè es pugui formar martensita i evitar que la peça quedi afectada pel procés.
- La **mida del gra** desplaça les corbes SS (nas característic) del diagrama TTT cap a la dreta quan aquesta augmenta, fent que la velocitat crítica del tremp sigui més baixa, com també disminueix les tensions residuals.

- El **medi de refredament** pot variar en funció d'alguns paràmetres de la peça que es vol trempar i afecta directament a la velocitat de refredament. Actualment existeix un procediment normalitzat que ens permet escollir el medi i l'agitació d'aquest.
- La **concentració de carboni** és el factor que repercuteix en la duresa de la martensita obtinguda, degut a que el carboni deforma els grans i provoca tensions en la microestructura. Contra més contingut de carboni o carbur de ferro hi hagi, més plaquetes es formaran dins els grans i més deformació, en conseqüència, s'obtindrà una major duresa. A més, si la concentració de carboni augmenta, la temperatura límit de tremp disminueix i les corbes del diagrama TTT es desplacen cap a la dreta, i viceversa.

Les fases de transformació que es produeixen en un aliatge determinat de l'acer estan representades en un diagrama logarítmic TTT (Temps-Temperatura-Transformació), el qual ens indica en quin moment i quant percentatge d'austenita rep una transformació específica, així com quan comença i acaba aquesta transformació. La zona superior del gràfic correspon a l'austenita a alta temperatura, si es refreda i es traspasa la primera línia de transformació s'inicia la transformació en una altra estructura, determinada pel temps i la temperatura del refredament. En el moment que es creua la segona línia de transformació, l'austenita transforma completament.

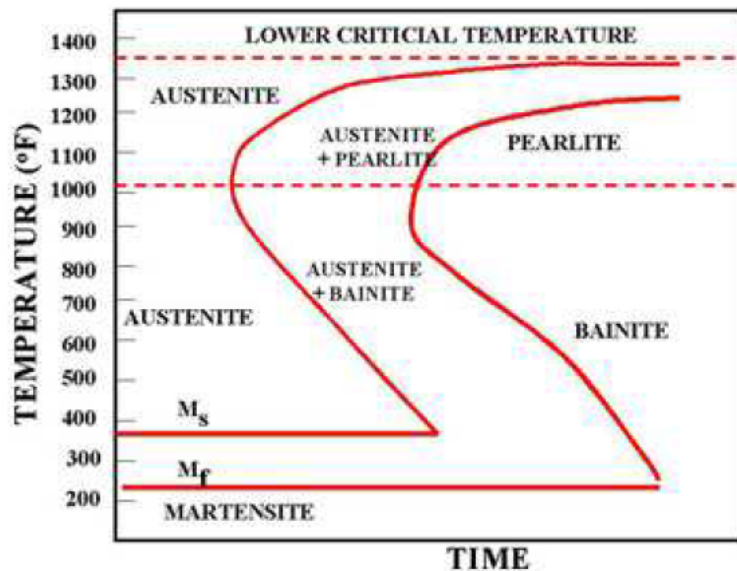


Figura 1.13. Diagrama TTT. ^[15]

En el diagrama TTT (figura 1.13) podem observar que si el refredament és lent i a temperatura elevada, s'obté una estructura perlítica. En canvi, si el refredament es realitza a temperatures per sota dels 1020°F, obtindrem bainita. Tanmateix, amb un refredament fort i en un curt període de temps, es pot aconseguir una estructura

martensítica. El terme M_s fa referència a la temperatura en la qual s'inicia la transformació martensítica espontàniament, i la M_f correspon a la temperatura en la qual finalitza aquesta transformació. Cal afegir que els elements d'aliatge influeixen significativament en la forma del diagrama TTT, donant corbes SS de nombroses formes. [2]

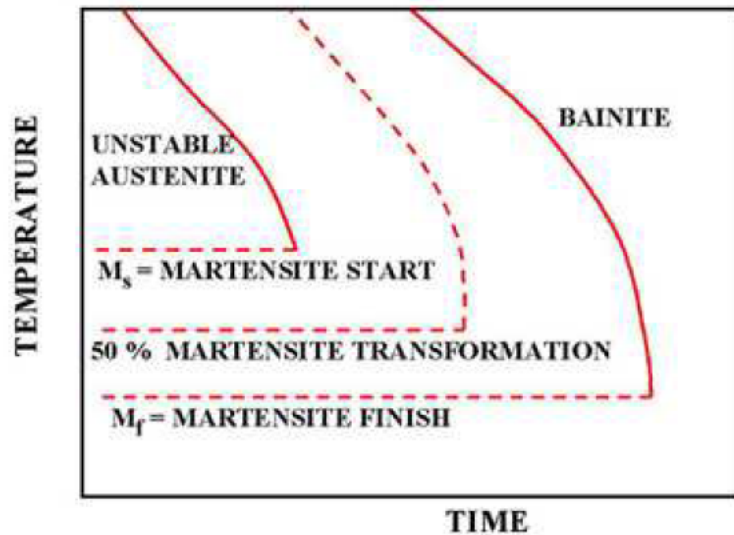


Figura 1.14. Diagrama TTT, part inferior. ^[15]

La velocitat de refredament es pot variar dins d'un rang amb la finalitat d'obtenir una estructura determinada. Com a exemple, per obtenir un 100% de martensita es pot refredar de manera molt violenta o més suau, fins al punt que la corba de refredament passi tangent al nas del diagrama (figura 1.15). Amb aquest valor més suau s'aconsegueixen menys tensions internes i es coneix com a velocitat crítica de refredament.

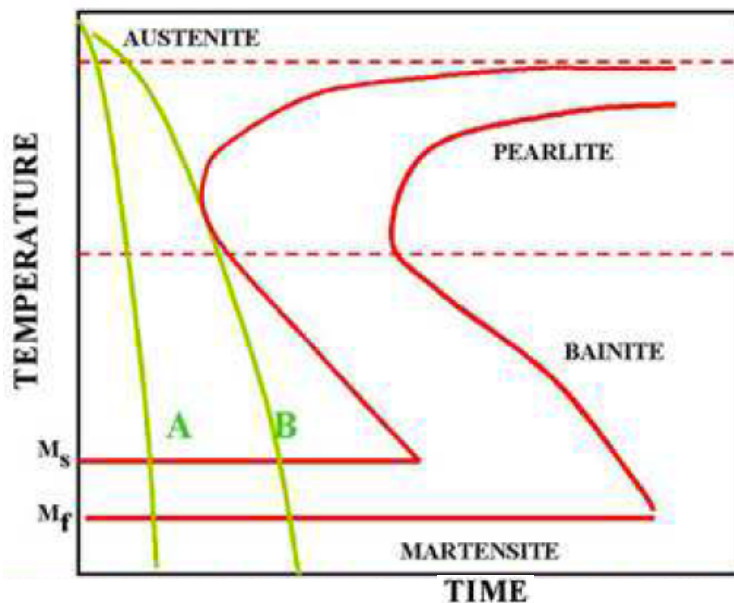


Figura 1.15. Les corbes A i B representen dos refredaments molt ràpids. La corba B correspon a la velocitat crítica de refredament. ^[15]

1.4.2. Transformació martensítica induïda mecànicament

Tal i com s'ha explicat en l'apartat anterior i es pot observar a la figura 1.14, la formació de martensita s'inicia a una temperatura M_s i finalitza a una M_f . Tot i això, aquesta mateixa transformació es pot donar a temperatures superiors a M_s amb l'ajuda d'una aportació d'energia al material, la qual es pot proporcionar mitjançant un esforç mecànic. La quantitat de martensita formada dependrà de la composició química del material, la temperatura, com és la sol·licitació i a quina velocitat es realitza.

L'austenita en acers inoxidable austenítics presenta una estructura cristal·lina cúbica centrada en les cares (FCC), aquesta s'obté per un apilament ABCABC... (figura 1.16) de plans densos {111}, on les vibracions de la seqüència són qualificades de defectes d'apilament.

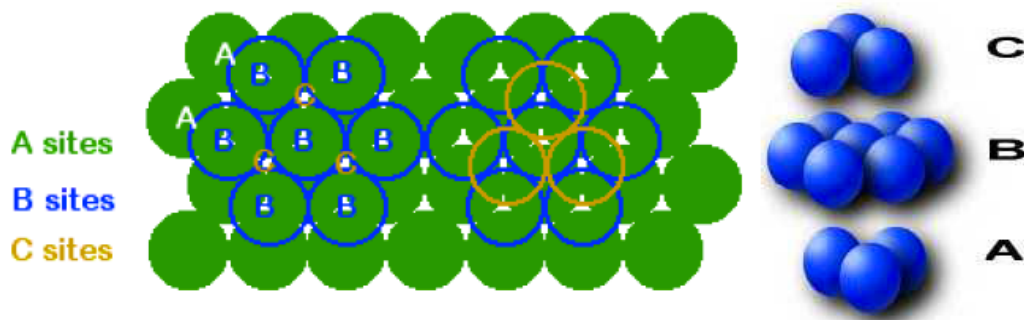


Figura 1.16. Apilament de plans ABC per l'estructura de l'austenita.

Durant el desplaçament de les dislocacions d'una estructura cristal·lina poden aparèixer variacions d'aquest apilament a causa de la dissociació d'una dislocació perfecta en dos de parcials, sempre que la suma de l'energia de les dislocacions parcials sigui inferior a la de la dislocació perfecta. Aquest fenomen provoca un defecte d'apilament, on la longitud depèn de l'equilibri entre les forces de repulsió de les dislocacions parcials i l'energia de defecte d'apilament (Stacking-Fault Energy, SFE).

L'energia SFE està associada a l'esforç que es necessita aportar per crear una dislocació, és a dir, una separació entre els àtoms al llarg d'un pla d'apilament. A més, és un paràmetre de gran importància en els materials, ja que afecta als mecanismes de deformació i al comportament mecànic de metalls i aliatges. També estableix la separació de les dislocacions parcials, de manera que té influència sobre la mobilitat d'aquestes.

Així doncs, una SFE elevada afavoreix la recombinació de les dislocacions parcials en una de perfecta o bé que directament aquesta no es divideixi en parcials. En canvi, com més baixa és aquesta energia, més separades es poden trobar les dislocacions parcials, la qual cosa dificulta la seva recombinació i amb més facilitat es dona la dissociació. Per tant, amb una SFE petita augmenten les propietats mecàniques del material, donat que és fa

més difícil provocar una futura deformació, per aquest fet s'afavoreixen altres mecanismes d'acomodació de deformació, com per exemple la transformació martensítica. [16]

En la següent figura es pot observar l'aparició dels diferents mecanismes de deformació que s'activen en la fase austenítica, els quals depenen críticament de l'energia de defecte d'apilament (SFE):

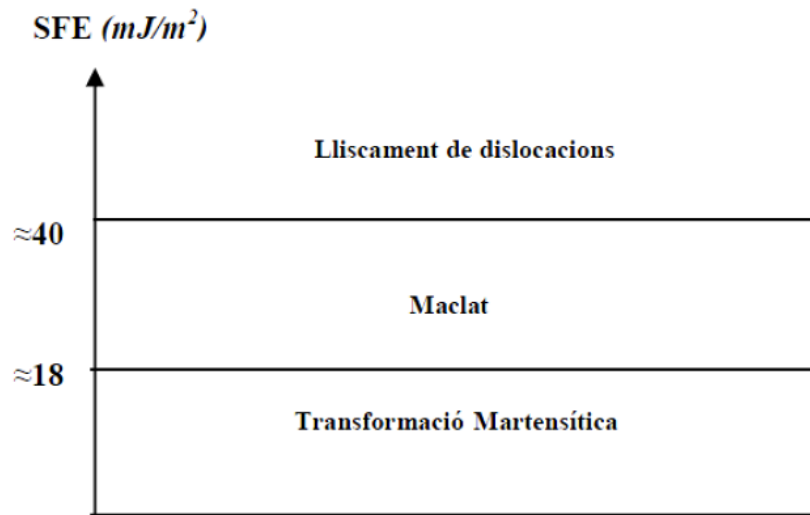


Figura 1.17. Mecanismes de deformació en funció de la SFE. ^[16]

Amb l'objectiu d'afavorir la transformació martensítica de l'acer, es necessita que el valor de la SFE sigui baix perquè no es creïn altres mecanismes per acomodar la deformació, tal i com ens mostra la figura 1.17. Així doncs, la transformació martensítica per deformació es dona en els acers inoxidable amb una SFE baixa, formant-se martensita α' directament o bé, martensita ϵ que al ser poc estable acaba transformant-se en martensita α' .

En concret, l'acer inoxidable austenític EN 1.4429 presenta un valor de SFE aproximat de $50,8 \text{ MJ/m}^2$, d'aquesta manera s'afavoreix el mecanisme de formació i creixement de bandes de lliscament. En canvi, l'acer EN 1.4318 (AISI 301LN) té un valor de la SFE de $6,14 \text{ MJ/m}^2$, fet que ens indica la dèbil estabilitat de la fase austenítica d'aquest acer, en conseqüència, la transformació martensítica serà el mecanisme predominant durant la deformació.

Com s'ha dit anteriorment, existeix una temperatura M_d en els casos en que la transformació martensítica està induïda per deformació, a aquesta temperatura es comença a formar martensita i es correspon a la màxima temperatura a la que l'austenita pot transformar a martensita per deformació plàstica. En el cas dels acers, els valors de M_d sempre es troben per sobre dels de M_s . Tanmateix, per estudiar els acers inoxidables austenítics és interessant que la temperatura M_s sigui inferior a la temperatura ambient per garantir que en aquestes condicions són completament austenítics. No obstant,

poden presentar-se dues situacions diferents en referència a la temperatura M_d , tal i com es mostra en la figura 1.18:

- El primer cas correspon als acers amb un valor M_d inferior al de la temperatura ambient, en aquests casos és necessari refredar l'acer prèviament a deformar-lo per tal de poder començar a obtenir martensita.
- El segon cas correspon als acers amb una M_d superior a la temperatura ambient, això afavoreix que l'austenita transformi a martensita en presència d'una acció mecànica que provoca una deformació plàstica en l'acer.

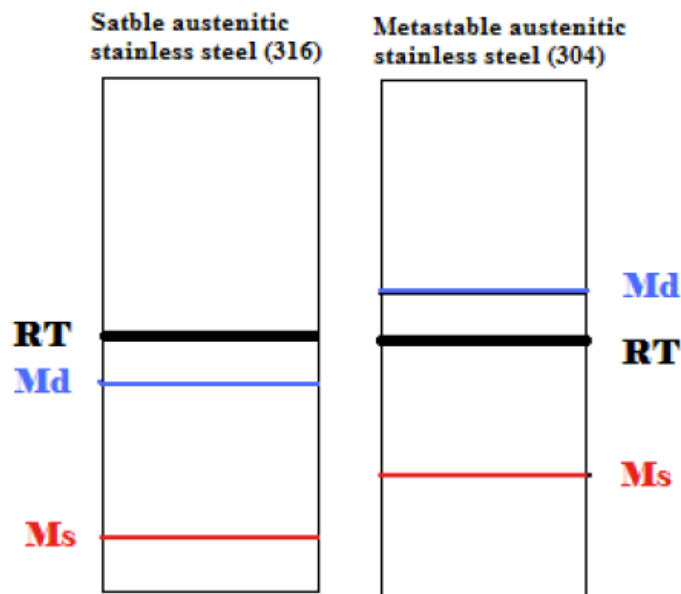


Figura 1.18. Representació esquemàtica de la *tendència de l'austenita a presentar transformació de fase a martensita respecte la temperatura ambient.* ^[17]

En resum, la transformació martensítica per deformació plàstica té un resultat important sobre la formació de la martensita, que és bàsicament augmentar les deformacions internes i facilitar la nucleació de la martensita. Tot i això, la quantitat de martensita que es forma amb aquest mètode disminueix a mesura que s'incrementa la temperatura, per consegüent, com s'ha explicat anteriorment és molt comú designar la temperatura més alta a la qual es pot formar martensita per deformació com M_d . [18]

En la següent figura es pot veure les possibilitats per induir la formació de martensita en el cas d'un esforç de tensió.

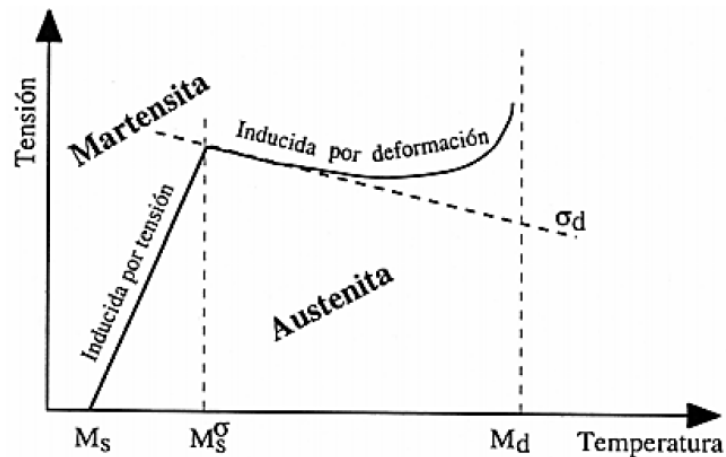


Figura 1.19. Transformació martensítica en funció de la temperatura i l'esforç extern. ^[18]

1.5. Procés de brunyit

Actualment i paral·lel a l'avanç tecnològic de nous materials es busca, a part d'aconseguir un acabat superficial excel·lent, millorar les propietats físiques i mecàniques de les peces, perquè presentin una major resistència a ambients corrosius, major resistència a fatiga en càrregues cícliques, incrementar la seva duresa superficial per reduir el desgast, disminuir la rugositat per disminuir la fricció entre components i induir esforços residuals per incrementar la vida útil de les peces, entre altres millores.

Els processos de deformació plàstica superficial (DPS) permeten millorar aquestes propietats i aconseguir un bon acabat superficial. Dins d'aquest tipus de procés trobem el brunyit amb bola que és un procés de manufactura avançada relativament nou, el qual ha demostrat ser un magnífic procés d'acabat superficial i capaç de millorar significativament algunes propietats físico-mecàniques de peces manufacturades.

Els processos que milloren l'acabat superficial per mecanitzat, es poden classificar en funció de dos principis fonamentals:

- **Extracció de material (viruta):** Aquests són coneguts com a processos abrasius, consisteix en utilitzar una eina de tall o desbast per remoure el material i assolir una rugositat mitjana (R_a) dins d'un rang entre 0,05 i 1,60 μm . Com a exemple d'aquests processos tenim: el rectificat, polit, fresat de super-acabat, esmerilat, etc.
- **Deformació plàstica superficial:** Aquests utilitzen diversos elements (làser, ultrasons, vibració, corró, bola, granalla, etc.) per deformar plàsticament la superfície, aconseguint d'aquesta manera la compressió d'una microcapa de

material. A diferència dels processos per arrencament de viruta, els processos DPS tenen la capacitat de millorar l'acabat superficial i diferents propietats mecàniques de les peces manufacturades, cosa que permet allargar la seva vida útil al millorar la resistència al desgast, fatiga i corrosió. Com a exemple d'aquests processos tenim: el polit amb eina de diamant, impacte per làser, vibració ultrasònica, granallat i diversos tipus de brunyit.

El brunyit amb bola, tal com s'ha explicat anteriorment, és un procés DPS d'elaboració en fred que ha demostrat induir una capa d'esforç residual més uniforme, amb major magnitud i profunditat. Tot i ser un procés que es coneix des de fa més de tres dècades, no ha estat fins aquests últims anys que s'ha incrementat el seu potencial com a procés d'acabat superficial i perfeccionador d'algunes propietats físiques i mecàniques. A més, amb aquest procés s'aconsegueix una rugositat mitjana (R_a) per sota de $0,5 \mu\text{m}$.

Aquest procés de manufactura avançada usualment s'aplica en la fabricació de motlles d'injecció de plàstic, eines per al conformat i tall de metalls, eixos, pistons, frens, engranatges, acoblaments, àleps, rotors, així com nombrosos components per diferents sectors industrials. D'altra banda, els materials més emprats en l'estudi del procés de brunyit amb bola són l'acer i l'alumini.

Convé ressaltar que el brunyit amb bola és un bon candidat per a la substitució de mètodes tradicionals per extracció de material i tractament tèrmic, els quals tenen un temps de producció elevat, consum de gran quantitat d'energia i poden arribar a ser altament contaminants. A continuació s'exposa en una taula de manera resumida els principals beneficis i inconvenients d'aquests processos:

<i>Procés</i>	<i>Beneficis</i>	<i>Inconvenients</i>
Brunyit amb bola	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Millora rugositat superficial, duresa i resistència a fatiga, desgast i corrosió. ▪ No genera viruta, procés més net. ▪ Incrementa vida útil de la peça. ▪ Precisió dimensional elevada. ▪ Procés d'acabat ràpid. ▪ Pot incrementar la duresa inicial del material fins un 60%. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Es necessita eina de brunyit mecànica o hidrostàtica. ▪ Requereix de refrigerant.

Extracció del material	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Millora rugositat superficial. ▪ S'utilitza eina d'adquisició fàcil i econòmica. ▪ No incrementa la duresa considerablement. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Indueix esforç residual de tensió. ▪ Genera viruta sobrant del procés. ▪ Procés d'acabat lent (3 m/min). ▪ Requereix de refrigerant.
Tractaments tèrmics i termoquímics	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Millora duresa i resistència a la corrosió i desgast. ▪ Allibera esforços residuals de tensió. ▪ Incrementa vida útil de la peça. ▪ Es pot assolir dureses entre 55 i 65 HRC. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Genera sobrants del procés. ▪ Consum d'energia elevat. ▪ Procés de tractament lent.

Taula 1.4. *Processos de millorament de propietats físico-mecàniques.* ^[19]

1.5.1. Brunyit amb bola

El procés de brunyit amb bola permet millorar propietats com la qualitat superficial al disminuir la rugositat, incrementar la duresa superficial i introduir esforços residuals de compressió. Arran d'aquestes millores permet incrementar la resistència al desgast, fatiga i corrosió; per la qual cosa s'augmenta la vida útil de la peça. A més, ofereix altres avantatges com una alta precisió dimensional, correcció de defectes de maquinat i es considera un procés ambientalment net ja que no genera ferritja.

El brunyit amb bola és un procés d'acabat d'elaboració en fred, que es realitza en la superfície de peces acabades prèviament. Aquest procés permet reduir significativament el temps d'una operació lenta, podent-se realitzar l'operació amb un avanç màxim de la màquina fins a 15 m/min, o inclús major si la màquina ho permet.

En aquest procés s'utilitza una eina anomenada brunyidor, aquesta posseeix com a element deformant una bola d'alta duresa amb un diàmetre que pot variar entre 3 i 12 mm. La bola exerceix una força normal suficientment alta per produir una petita deformació plàstica, això produeix un desplaçament del material dels pics als valls de les microirregularitats de la superfície, reduint la rugositat i aconseguint una microcapa de material comprimit amb una alta duresa superficial.

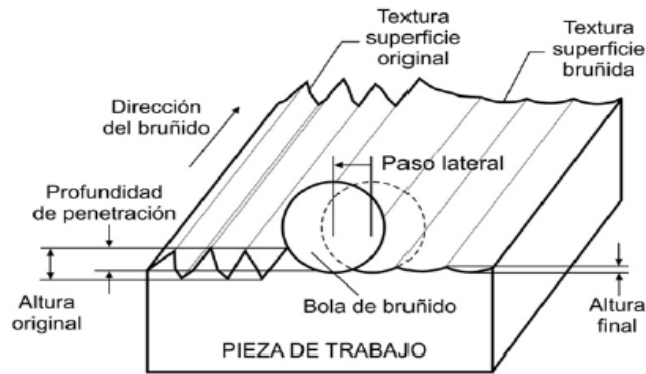


Figura 1.20. Representació esquemàtica del procés de brunyit amb bola. ^[20]

El procés es pot realitzar en un torn convencional, torn CNC i fresadora CNC. A nivell industrial s'utilitzen dos tipus de brunyidors de bola, que es classifiquen segons la manera de sostenir la bola. La primera eina, amb la qual treballarem en el present projecte, sosté la bola de manera mecànica, suportada elàsticament per una molla amb ressort que es pot calibrar per compressió amb l'objectiu de generar la força normal requerida. La segona es basa en una molla hidrostàtica, en aquest cas la bola es suportada de manera hidrostàtica mitjançant la pressió subministrada per una bomba hidràulica. El principal inconvenient de la primera eina és la pèrdua de càrrega amb el recorregut de la molla.

En ambdues eines, la compressió directa de la bola sobre la superfície de la peça produeix una deformació plàstica generant una microcapa comprimida de material, això fa que s'indueixin esforços residuals de compressió, amb un valor màxim a la capa subsuperficial (zona molt propera a la superfície) y que disminueix ràpidament en augmentar la distància des de la superfície. Aquests esforços de compressió elevats permeten un increment en la resistència a la fractura de les peces per fatiga, així com un augment de la resistència a possibles esquerdes per corrosió.

Existeix una gran part d'investigacions científiques enfocades al procés de brunyit amb bola, que es centren en estudis experimentals per determinar la influència que tenen alguns paràmetres específics del procés, com per exemple: força de brunyit, avanç, velocitat, diàmetre de bola, tipus de lubricant, numero de passades, etc. Els paràmetres que més s'han estudiat en les diferents investigacions del procés són la força del brunyit (força normal exercida per la bola sobre la superfície de treball), l'avanç (desplaçament del brunyidor sobre la superfície) y el número de passades.

La combinació entre la força de brunyit i l'avanç millora considerablement la rugositat i la duresa, tot i això, existeix un valor límit per a la força de brunyit que si es sobrepassa es genera la deterioració plàstica de la superfície, produint una petjada de l'ample de contacte de la bola i provocant un increment de la rugositat. Generalment, s'aconsella emprar forces de brunyit per sota dels 400 N, per tal d'evitar el deteriorament plàstic.

El número de passades ha demostrat ser un dels paràmetres del procés que millora significativament la rugositat superficial i la duresa, a més, es considera el segon factor amb major influència després de la força de brunyit. El número de passades fa referència al número de vegades que l'eina passa per la superfície de treball de la peça. En aquest cas es recomana realitzar entre 2 i 4 passades, ja que en augmentar aquest número de passades, s'ha observat en diferents materials que la rugositat augmenta i la duresa empitjora. Aquest efecte s'atribueix a l'enduriment excessiu de la superfície degut a la compressió, la qual produeix una descamació superficial de la peça.

En la següent taula es mostren els valors dels paràmetres amb major influència que es recomanen utilitzar, per a una bona optimització del brunyit amb bola i obtenir una millora substancial en la rugositat i la duresa:

Paràmetre	Rang de valors
Força de brunyit	100 – 400 N
Avanç	0,01 – 0,40 mm/rpm
Numero de passades	2 - 4

Taula 1.5. Valors òptims dels paràmetres més influents del procés de brunyit amb bola.

1.5.2. Brunyit amb bola assistit per vibració

Assistir els processos de fabricació tradicionals, fent ús dels continus avanços tecnològics, és un dels grans reptes de la indústria moderna, ja que en paral·lel a l'optimització dels paràmetres crítics propis de cada procés, la introducció de làser, vibracions, polsos de corrent i d'altres, contribueix en gran part a la millora significativa dels mètodes convencionals. Freqüentment apareixen noves eines que han sigut millorades gràcies a la introducció d'algun tipus d'assistència.

En la majoria d'estudis realitzats sobre l'ús de les vibracions valoren positivament aquesta assistència, degut a que suposa un recurs de gran utilitat en l'optimització i economia dels processos de fabricació, sobretot aquells limitats per les forces, els règims de treball i les capacitats pròpies dels sistemes per actuar sobre materials fràgils, durs o peces amb geometries complexes.

La majoria de les eines assistides amb vibracions, utilitzen actuadors piezoelèctrics per tal de generar aquesta vibració, i normalment treballen al voltant dels 20 – 40 kHz. Aquestes vibracions contribueixen a facilitar la realització dels processos de deformació plàstica en la majoria dels casos, fent possible disminuir paràmetres com la força necessària per deformar o capacitant les eines per treballar amb materials més durs.

En la figura 1.21 es pot observar un bon exemple de com pot variar els resultats de la rugositat superficial, producte d'un procés de mecanitzat quan s'utilitza una eina de tall assistida per una vibració ultrasònica. En aquest cas es pot apreciar amb claredat com existeix una diferenciació entre els valors de rugositat superficial mitjans R_a , mesurats per a cada un dels processos. En la imatge superior, que representa la topografia del tornejat assistit per ultrasons, s'aprecia un valor de R_a lleugerament inferior al de la representació topogràfica d'un tornejat convencional, corresponent a la imatge inferior.

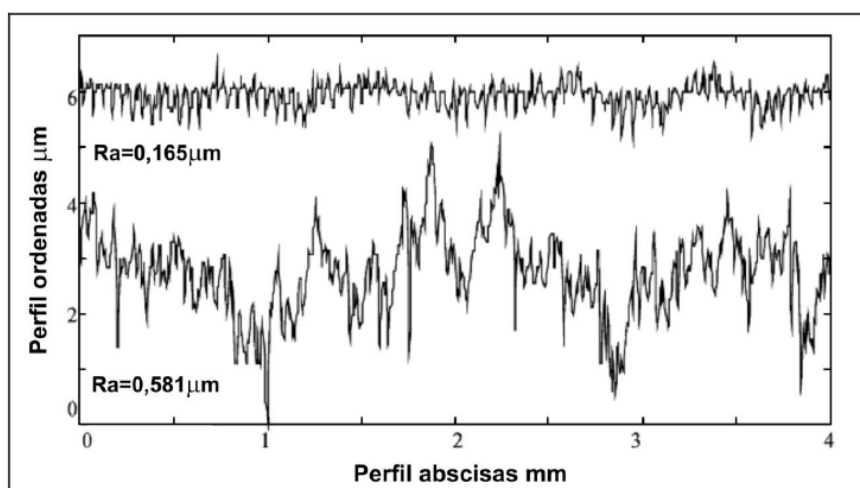


Figura 1.21. Comparació gràfica entre la rugositat superficial obtinguda amb un tornejat assistit per ultrasons (superior) i un convencional (inferior). ^[20]

L'assistència de les vibracions aporten al procés de brunyit, d'una banda, un increment de forces que actuen en benefici de tot el procés; i d'altra banda, l'acció de l'onda vibratòria dissipa una energia capaç de facilitar l'alliberament de les dislocacions que estan aferrades en les capes més externes del material de la peça, proporcionant que aquestes es moguin amb major velocitat.

Aquest valor addicional es tradueix en un increment de la força efectiva aplicada sobre la peça de treball, la qual es producte de les vibracions i es pot estimar la seva magnitud. Per al procés de brunyit assistit per vibracions, la força total (F_t) que s'exerceix sobre la superfície del material, es pot calcular com la suma de la força constant que resulta de l'acció directa de la precàrrega de l'eina (F_m), més la força sinusoidal variable en el temps que produeix les vibracions (F_v). A més, a aquests dos valors s'han d'afegir les vibracions causades per l'entorn on s'està brunyint la peça (η). Per tant, F_t es pot calcular segons l'equació (1.3).

$$F_t = F_m + F_v(t) + \eta \quad (\text{Eq. 1.3})$$

La força realitzada per l'eina de brunyir es aquella que exerceix la molla de la mateixa eina, la qual pot ser calculada per la llei de Hooke (1.4).

$$F_m = k(x_1 + x_2) + F_0 \quad (\text{Eq. 1.4})$$

On k és la constant de l'eina que té un valor predeterminat de fabricació; x_1 la magnitud que es desplaça la molla quan es comprimeix; x_2 la variació mitja que pateix l'eina quan s'activa la vibració i F_0 la precàrrega de la molla.

1.5.3. Eina de brunyir

En els següents subapartats s'exposa en detall el disseny mecànic, el funcionament i les propietats de l'eina de brunyir que s'utilitza en el present projecte, per dur a terme el procés de brunyit sobre la superfície de les plaques d'acer que es volen estudiar.

El disseny mecànic d'aquesta eina s'estructura en tres unitats funcionals diferents, les quals treballen alhora per executar el procés. En aquest disseny, la funció del transductor piezoelèctric és fonamental per tal d'aconseguir el component vibratori de la força requerida pel procés de brunyit.

L'alta freqüència i la baixa amplitud del moviment característic de la bola de brunyir comporta una notable dificultat tècnica. Per tant, tenim la necessitat d'utilitzar diferents tècniques per registrar i reconstruir l'ona generada pel prototip ultrasònic. Aquests tests inclouen el control de moviment amb imatges HD, emissions acústiques i mesures dinamomètriques amb una alta freqüència de mostreig, amb l'objectiu de garantir el funcionament de l'eina quan el piezoelèctric està excitat.

Construcció mecànica

El prototip està compost per una molla de compressió, que té la funció de controlar la precàrrega del brunyit, i incorpora un sistema innovador de suport per a la bola de brunyir. Per executar correctament el procés de brunyit, el prototip ha de complir les següents especificacions:

- Garantir el rodament constant de la bola de brunyir durant tot el procés.
- Controlar amb una certa fiabilitat la magnitud de precàrrega amb una molla calibrada.
- Permetre l'intercanvi de l'eina en màquines diferents.

L'eina de brunyir també té uns requeriments addicionals que es nombren a continuació:

- Separar tots els dispositius electrònics de l'interior de la màquina d'un ambient humit.
- Transmetre el moviment vibratori, originat en el piezoelèctric, a la bola de brunyir.

Més enllà dels aspectes mencionats, la característica principal que ha de satisfer l'eina és la de proporcionar una força total de brunyit oscil·latòria (F_t), producte de la superposició dels dos components principals: la precàrrega (F_m), aplicada durant la fase preliminar de l'operació de brunyit a través del control de la molla de compressió; i la força oscil·latòria (F_v), proporcionada per les vibracions de la pila del piezoelèctric. Durant el procés, la força actual del brunyit ha de ser el resultat de la composició d'ambdues, modificada per una variació no controlada deguda a la interacció de la bola amb les irregularitats de la superfície. Aquesta força es calcula mitjançant l'equació 1.3, on η és la variació de la força de baixa freqüència propi de les irregularitats topològiques trobades durant l'avanç de l'eina.

Un cop considerats tots els requeriments tècnics, el disseny final està format per tres unitats diferenciades (figura 1.22). Els tres mòduls en conjunt, permeten regular la precàrrega, introduir el component vibratori en el sistema i solapar i transmetre ambdós a la peça de treball. Posteriorment es presentarà una descripció més detallada dels mòduls.

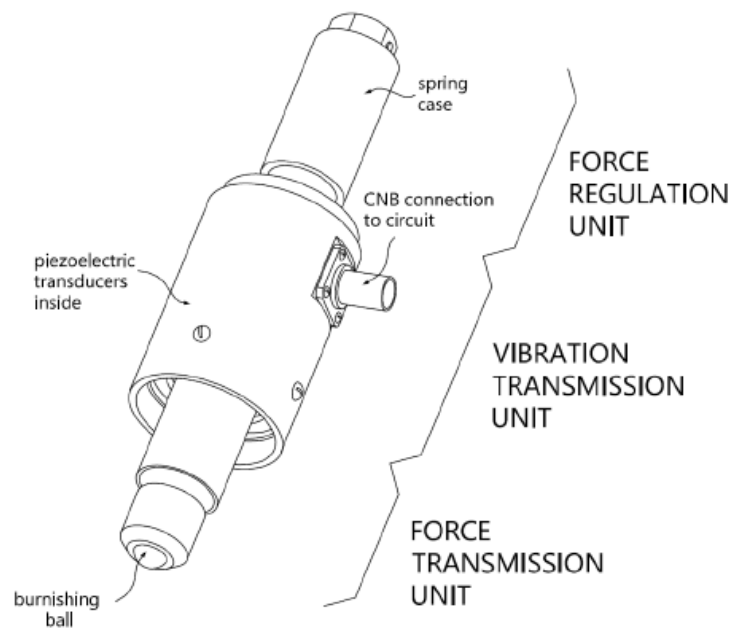


Figura 1.22. Estructura de l'eina de brunyir ultrasònica. ^[21]

Unitat de regulació de la força

La unitat de regulació de la força (FRU) està constituïda per les parts responsables de la selecció i control de la precàrrega (F_m), aplicada durant una operació de brunyit en la bola. Aquesta força és la responsable principal de la deformació plàstica durant els dos possibles processos, amb vibració (VABB) i sense vibració (NVABB). La molla calibrada, responsable del control de la força, es situa dins d'una carcassa cilíndrica $\varnothing 25$ AISI 1045, que llisca lliurement al llarg d'una vareta de manera coaxial cap a l'eix central de

l'eina (figura 1.23). La carcassa metàl·lica també serveix per fixar l'eina a la màquina, subjectant-la al porta-eines.

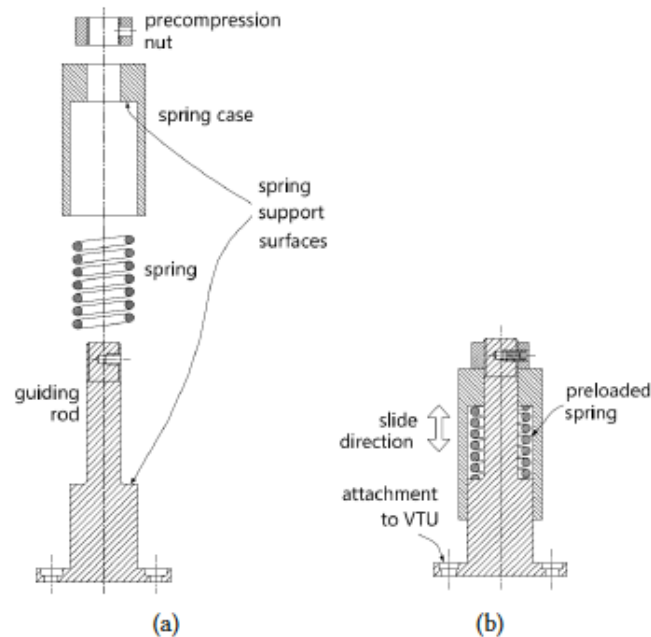


Figura 1.23. Representació esquemàtica de la unitat de regulació de la força. a) Vista explosionada. b) Parts acoblades i compressió de la molla. ^[21]

La longitud de compressió experimentada per la molla defineix la precàrrega del brunyit, la qual pot ser calculada per la llei de Hooke (Eq. 1.4) que ens indica la força elàstica exercida per la molla dins la unitat. La compressió de la molla és possible gràcies al moviment axial i lliure en la seva carcassa, que l'empeny convenientment de manera que la precàrrega pot ser regulada durant l'operació de brunyit. Quan l'eina és fixada al capçal de la màquina, aquest és apropat a la peça de treball fins que la bola contacta amb la superfície. A partir d'aquest punt, l'avanç del capçal de l'eina es convertirà en una compressió de la molla. Aquesta transmissió de la força es possible degut a la rigidesa de les connexions entre la base de la vareta i la carcassa del cos central de l'eina.

Amb l'objectiu de controlar la precàrrega amb precisió, es va realitzar una fase prèvia de calibrat per tal de definir la rigidesa i la precàrrega actual de la molla. Aquesta té una rigidesa nominal de 100 N/mm. El prototip de l'eina es va provar a través d'una màquina de proves equipada amb una cèl·lula de càrrega de 2 kN. L'eina es recolzava en una part auxiliar que simulava el porta-eines, aleshores la màquina de proves comprimia la molla a una velocitat constant al mateix temps que registrava la força pel dispositiu d'adquisició de dades "Spider8", amb una freqüència de mostreig de 60 Hz (figura 1.24).

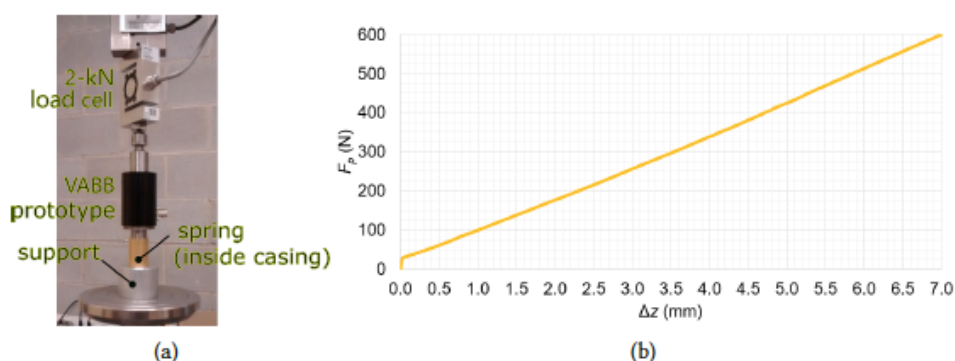


Figura 1.24. Calibrat de la molla del prototip VABB. a) Vista de la instal·lació experimental. b) Corba de calibrat obtinguda per compressió a una velocitat constant de 100 mm/min. ^[21]

Aquesta operació de calibrat es va dur a terme amb tres velocitats constants de compressió diferents (1, 10 i 100 mm/min), transformant la sèrie de dades temporals en desplaçaments. Les respectives línies resultants dels calibrat eren calculades utilitzant un full de càlcul de Microsoft Excel (taula 1.6). La coordenada que intercepta y correspon a la força de precompressió, deguda a la compressió inicial causada per la pressió exercida de la rosca superior roscada a la base del suport.

Els resultats també mostren que la constant d'elasticitat actual de la molla (k), té un valor mitjà de $83,70 \pm 0,61$ N/m, el qual es troba dins de l'interval definit pel catàleg el proveïdor. D'altra banda, degut a la varietat de forces de precompressió en funció de la longitud d'enroscat del cargol, les operacions de calibratge es van realitzar prèviament a tots els assajos experimentals per a verificar el seu valor.

V_{comp} (mm/min)	F_0 (N)	K (N/mm)	R^2
1	30,33	83,12	0,9991
10	29,26	83,65	0,9999
100	28,31	84,34	0,9992

Taula 1.6. Calibratge dels paràmetres de la molla a diferents velocitats de compressió. ^[21]

Unitat de transmissió de la força

La funció assignada en aquest mòdul es l'execució de la força de brunit (F_t), superposant i transmeten alhora la precàrrega, controlada mitjançant la unitat descrita prèviament, i la força d'oscil·lació provocada per la unitat presentada en el

següent apartat. El transmissor mecànic final d'aquesta força és la bola de brunyir, la qual està recolzada en uns rodaments que tenen forma de petites esferes i estan dins d'una guia en el capçal de l'eina (figura 1.25). Aquest capçal és realment l'extensió de la fina superfície del suport on els discos piezoelèctrics es troben subjectats. La segona funció tracta d'amplificar l'amplitud de vibració del material piezoelèctric des de l'extrem, on està fixat.

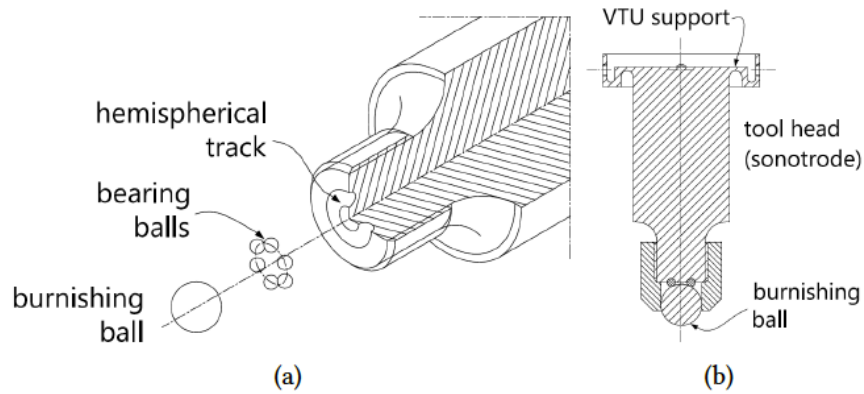


Figura 1.25. Representació esquemàtica de la unitat de transmissió de la força.
a) Detall dels rodaments i la guia mecanitzada. b) Secció de l'asseblatge dels components del FTU. ^[21]

Unitat de transmissió de la vibració

Aquest mòdul es compon dels elements necessaris per generar el component ultrasònic vibratori de la força de brunyit (F_v). Les especificacions dissenyades que descriuen la força que aquesta unitat hauria de poder aportar es poden veure a la taula 1.7.

Paràmetre	Valor
Freqüència	40 kHz
Amplitud (eina descarregada)	10 μm

Taula 1.7. Especificacions dinàmiques imposades pel prototip VABB. ^[21]

El principi en el qual es basa la generació de la F_v és en el canvi de l'espessor del material piezoelèctric polaritzat, quan aquest està subjecte a un diferencial de potencial. Aquests transductors piezoelèctrics es deformen en conseqüència a la freqüència emesa pel camp elèctric que l'excita. Aquest és el principi sobre el qual es basa aquest VTU, així com també es basa en anterior aplicacions exitoses sobre eines de mecanitzat assistides per vibració.

Aquest disseny contempla la instal·lació del transductor piezoelèctric dins d'un recipient tancat, juntament amb el corresponent contrapès. Aquesta part es fixa en una fina superfície estesa a la part superior del sonotrodo, amb la finalitat d'assegurar la connexió amb el FTU. A la part superior d'aquest recipient, trobem cargolat el suport de la molla i el conjunt FRU descrit anteriorment. L'excitació elèctrica de la transmissió vibratòria unitària és generada per l'aparell extern A CNB, el qual connecta els elèctrodes entremig dels discos piezoelèctrics i el circuit electrònic.

El FRU fa referència a la força estàtica donada per l'eina a través de la compressió de la molla. Tot i així, aquest prototip es caracteritza per tenir l'habilitat de transmetre un moviment vibratori a la bola de brunyir, això és possible gràcies a un conjunt de parts ceràmiques piezoelèctriques unides juntament a aquesta bola. El principi de la piezoelectricitat justifica i explica el comportament de l'eina, així com el seu potencial per implementar el procés del VABB.

Piezoelectricitat com a font de vibracions

La piezoelectricitat consisteix en la macropolarització del material com a resultat de la creació dels micropols, que sorgeixen del trastorn en la microestructura. La magnitud que representa com s'estén la polarització ocorreguda és el vector polarització P_p (Eq. 1.5), la seva direcció defineix l'eix de la polarització i està orientat segons la connexió entre el pol positiu i el negatiu.

$$P_p = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum P_\mu}{\Delta V} \quad (\text{Eq. 1.5})$$

On ΔP és el volum finit del material, i P_μ és el vector polarització microscòpic.

En condicions normals, un material piezoelèctric és neutral. Quan s'aplica una força externa, els àtoms es desplacen i la molècula neutral original es transforma en un microdipol. Un efecte afegit dels micropols en el volum piezoelèctric comporta una polarització total. Aquest és l'efecte directe piezoelèctric representat a la figura 1.26, on es pot veure que inicialment la molècula PZT és neutral, tal i com ho és generalment (imatge esquerra); però en aplicar una força externa, les molècules són sotmeses a una pressió T i el material es polaritza (imatge dreta).

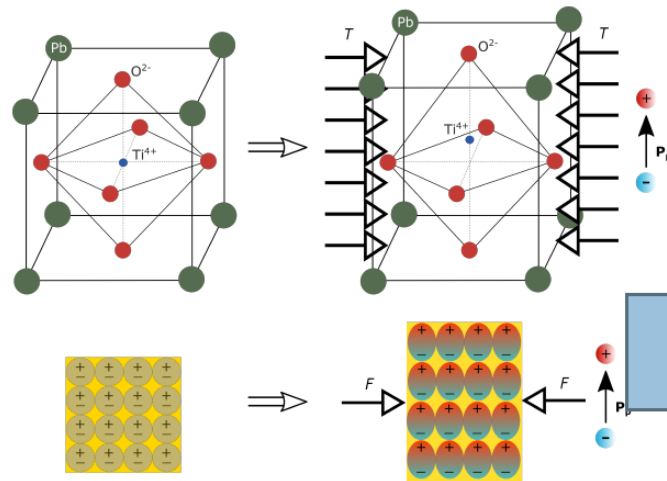


Figura 1.26. Efecte piezoelèctric directe: des de la micropolarització (inferior), fins la macropolarització (superior). ^[21]

A més de l'efecte directe piezoelèctric, un efecte invers piezoelèctric pot ser observat en aquest tipus de materials, un cop han estat prèviament polaritzats per l'acció directa d'una força (figura 1.27). Està modificat per una proporcionalitat entre l'esforç sofert pel material piezoelèctric neutral (ϵ_p), quan està sotmès a un camp elèctric (E) i a la magnitud d'aquest camp. Ambdós factors són proporcionals l'un amb l'altre (Eq. 1.6). Aquest efecte invers piezoelèctric és la teoria base dels actuadors piezoelèctrics fabricats.

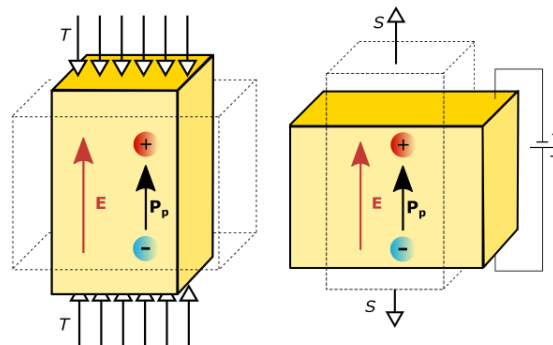


Figura 1.27. *Esquerra:* Efecte directe piezoelèctric. *Dreta:* Efecte invers piezoelèctric. La línia discontinua indica el canvi geomètric causat per l'aplicació d'una pressió o d'un camp elèctric, respectivament. ^[21]

$$\epsilon_p \propto E \quad (\text{Eq. 1.6})$$

La possibilitat d'aparellar ambdós efectes és el que explica la capacitat de la piezoelectricitat per transformar energia elèctrica en energia mecànica, la qual és el principi en el que es basa aquesta eina VABB.

Configuració dels discos piezoelèctrics

La configuració resultant dins del prototip de la bola de brunyir, consisteix en un conjunt de quatre discos piezoelèctrics PZT8, apilats l'un sobre l'altre. Aquests discos estan separats per elèctrodes metàl·lics, connectats alternativament a una font de tensió oscil·lant. Aquesta distribució permet una actuació axial dels sistemes, sempre que estiguin excitats per un camp elèctric alineat amb la direcció de polarització.

Aquesta configuració és una clàssica solució d'enginyeria, que presenta una eficàcia molt alta en transformar electricitat en energia mecànica, d'aquesta manera entrega exitosament una vibració vertical a la bola de brunyir.

L'apilament dels discos es fixa a una fina superfície a la part superior del sonotrodo del FTU, així doncs permet el funcionament conjunt d'ambdues unitats, tal i com s'ha explicat anteriorment. A la figura 1.28 es pot observar la connexió del VTU-FTU. Aquest apilament piezoelèctric és excitat mitjançant una connexió a un generador extern, el qual transforma la senyal elèctrica en un voltatge AC monofàsic de 40 kHz i 1,3 kV.

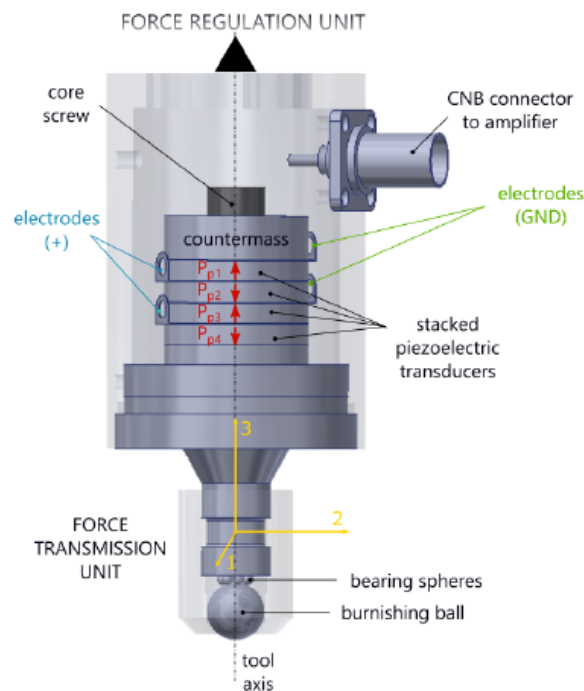


Figura 1.28. Plats piezoelèctrics apilats dins del VTU del prototip VABB. ^[21]

CAPÍTOL 2:

PROCEDIMENT

EXPERIMENTAL

2.1. Material estudiat

El material estudiat en el present projecte és l'acer austenític inoxidable metastable EN 1.4318 (AISI 301LN), subministrat en quatre condicions diferents de recuit i de deformació en fred. Aquestes son conegudes comercialment com 2B, C850, C1050 i C1250. Amb l'objectiu de facilitar l'estudi s'ha establert en la memòria una nomenclatura per a cada tipus (taula 2.1).

<i>Tipus d'acer</i>	<i>Designació comercial</i>	<i>Nomenclatura</i>	<i>Condicció</i>
EN 1.4318	2B	R	Recuit
	C850	L10	Deformació en fred 10%
	C1050	L20	Deformació en fred 20%
	C1250	L40	Deformació en fred 40%

Taula 2.1. Acers austenítics inoxidables metastables estudiats.

Aquests acers han estat subministrats per l'empresa belga *OCAS NV, Arcelora-Mittal R&D Industry Gent*, en forma de xapa d'1,5 mm d'espessor.

2.1.1. Composició química

Segons el que es presenta a la taula 2.2, la composició química definida en percentatge màssic (%) classifica aquest acer com un acer inoxidable austenític:

<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Mo</i>	<i>N</i>
0,015	17,36	7,18	0,55	1,68	0,23	0,10

Taula 2.2. Composició química de l'acer estudiat (%).^[22]

2.1.2. Microestructura

Per començar, l'acer recuit (R) té una microestructura inicial majoritàriament formada d'austenita i amb uns percentatges de martensita no superiors al 3%. Els grans austenítics tenen una estructura cristal·logràfica FCC (Fe- γ) i una mida de gra de $11,66 \pm 4,35 \mu\text{m}$ (figura 2.1). [23]

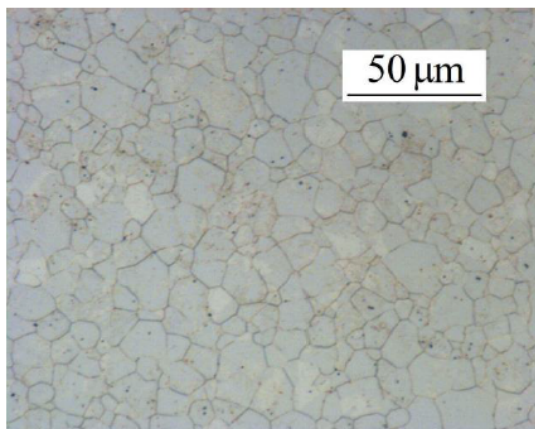


Figura 2.1a. Fase austenítica de l'acer recuit 2B (R). [23]

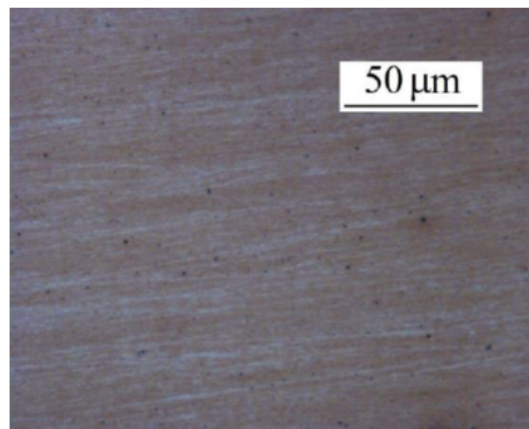


Figura 2.1b. Fase martensítica ($\alpha' < 3\%$) de l'acer recuit 2B (R). [23]

En segon lloc, l'acer deformat en fred (L10) presenta un percentatge de martensita entre el 8 i el 10%. Els grans austenítics tenen una mida de gra de $8,55 \pm 3,74 \mu\text{m}$ (figura 2.2). [23]

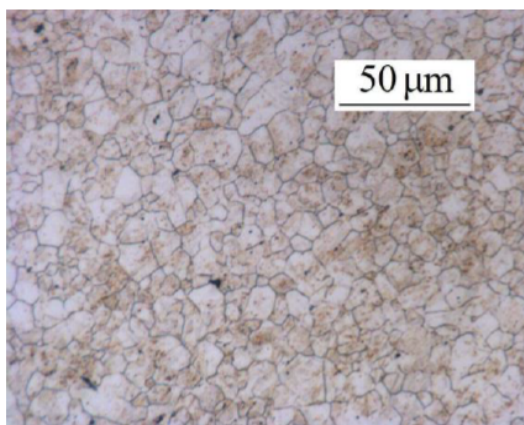


Figura 2.2a. Fase austenítica de l'acer laminat en fred C850 (L10). [23]

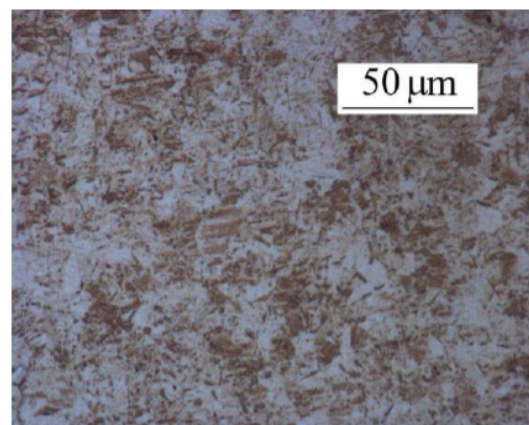


Figura 2.2b. Fase martensítica (8-10% α') de l'acer laminat en fred C850 (L10). [23]

D'altra banda, l'acer deformat en fred (L20) presenta un percentatge de martensita del 28%. Els grans de la fase austenítica tenen una mida de gra de $9,05 \pm 4,21 \mu\text{m}$ (figura 2.3). [23]

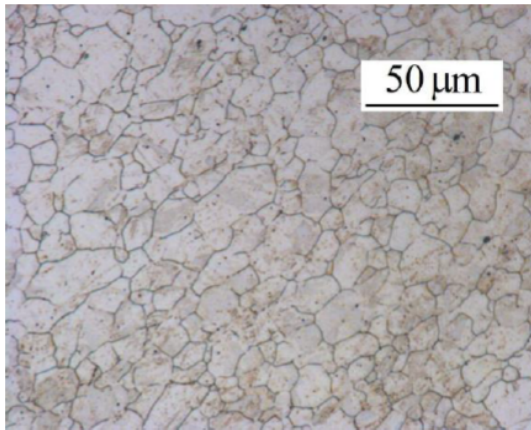


Figura 2.3a. Fase austenítica de l'acer laminat en fred C1050 (L20). ^[23]

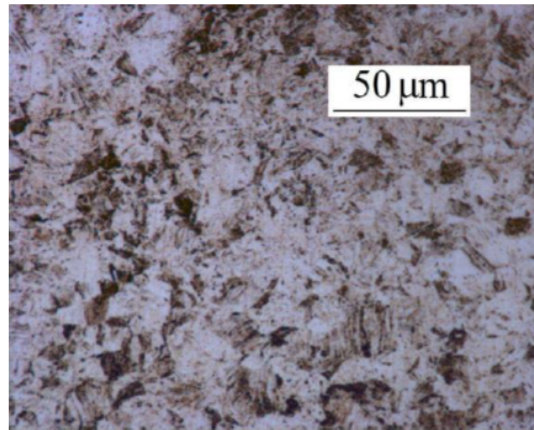


Figura 2.3b. Fase martensítica (28% α') de l'acer laminat en fred C1050 (L20). ^[23]

En darrer lloc, l'acer deformat en fred (L40) presenta un percentatge de martensita del 38%. És necessari ressaltar que en tots els casos l'estructura cristal·logràfica de la martensita és BCC ($\text{Fe-}\alpha'$), a més, no s'observa la presència de martensita- ϵ . En aquest cas, els grans austenítics, els quals estan lleugerament orientats en la direcció del laminat (figura 2.4), tenen una mida de $9,24 \pm 4,19 \mu\text{m}$. [23]

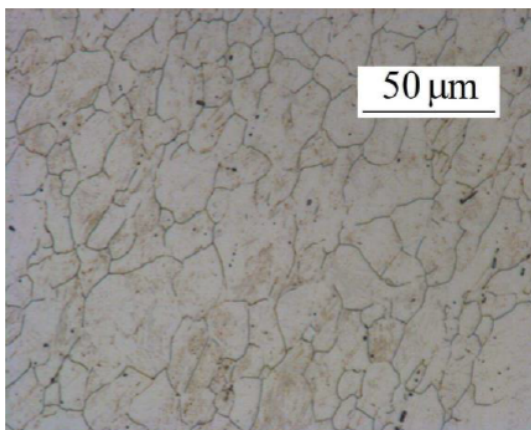


Figura 2.4a. Fase austenítica de l'acer laminat en fred C1250 (L40). ^[23]

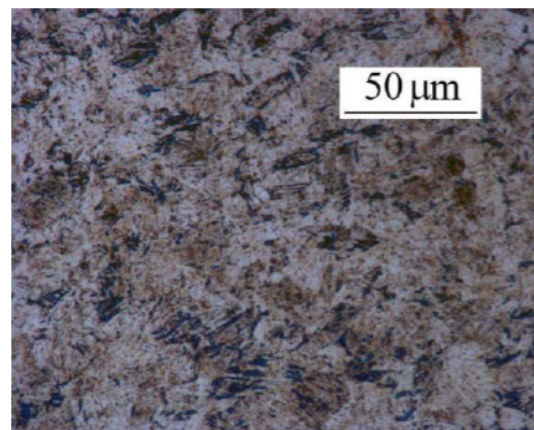


Figura 2.4b. Fase martensítica (38% α') de l'acer laminat en fred C1250 (L40). ^[23]

2.1.3. Propietats físiques

L'acer inoxidable EN 1.4318 (AISI 301LN) inicialment, en estat de recuit (R), no presenta propietats magnètiques, però quan aquest es deforma en fred (L10, L20 i L40) es torna magnètic arran de la transformació martensítica que sofreix. Resumidament, les propietats físiques de l'acer inoxidable austenític metastable 301LN es reuneixen a la taula 2.3:

Densitat [Kg/dm³]	Mòdul de Young [GPa]	Coefficient d'expansió tèrmica [10⁻⁶·K⁻¹]	Conductivitat tèrmica [W/(m·K)]	Calor específic [J/(Kg·K)]	Resistivitat elèctrica [(Ω·mm²)/m]
7,844	200	16,5 – 17,5	15	500	0,73

Taula 2.3. Propietats físiques de l'acer AISI 301LN.^[4]

2.1.4. Propietats mecàniques

Les propietats mecàniques de l'acer EN 1.4318 són afectades significativament per la deformació en fred i la consegüent transformació martensítica, per aquest motiu l'acer manifesta major resistència a la tracció i un augment de la duresa, així com la disminució de la ductilitat (taula 2.4). [23]

Tipus d'acer	Límit elàstic [MPa]	Resistència a la tracció [MPa]	Allargament [%]	Duresa HV10
Acer recuit	360	902	60	240
Acer laminat (C850)	650	967	38	300
Acer laminat (C1050)	926	1113	25	400
Acer laminat (C1250)	1148	1173	20	436

Taula 2.4. Propietats mecàniques de l'acer AISI 301LN.^[4]

2.2. Metodologia

El procediment que s'ha executat per a cada una de les mostres en els assajos realitzats i el seu posterior anàlisi són els descrits a continuació:

1. Dur a terme una sèrie de ratlles amb diferents condicions, emprant l'eina de brunyir, sobre la superfície de les làmines d'acer recuit i deformat en fred per seleccionar les variables del procés de brunyit. L'estudi previ de les diferents condicions que interaccionen en el brunyit s'ha realitzat segons s'explica en l'apartat 2.3.
2. Mitjançant mordaces s'ha fixat la mostra al portamostres de la fresadora CNC.
3. Realitzar el tractament superficial de brunyit fent una petjada diferent per a cada condició de brunyit, les quals s'estudien posteriorment.
4. Tallar l'acer sobrant de la mostra amb la talladora de disc diamant, netejar-la en bany d'ultrasons i marcar-la tal com s'indica més endavant a l'apartat 2.5.
5. Fotografiar les petjades, produïdes sobre les làmines d'acer, utilitzant el microscopi confocal per observar l'estat superficial i comparar-les entre les diferents condicions.
6. Fotografiar i analitzar les petjades mitjançant microscòpia òptica de rastreig (SEM) per observar els mecanismes de desgast.
7. Mesurar la rugositat superficial de les petjades mitjançant el rugosímetre segons detalla el punt 2.6.1.
8. Mesurar el perfil de les petjades amb l'interferòmetre, així com s'indica en l'apartat 2.6.4.
9. Tallar la mostra en direcció perpendicular a la petjada utilitzant la talladora de disc diamant, de manera que aquesta quedi dividida en dos parts aproximadament iguals.
10. Encastar les mostres en baquelita.
11. Polir les mostres encastades segons s'indica en l'apartat 2.5.
12. Realitzar un perfil de microindentacions, en la secció transversal de les mostres encastades, mitjançant el microduròmetre.

2.3. Selecció de les variables del procés de brunyit

Prèviament a la realització de les petjades mitjançant un tractament de brunyit complet, amb la finalitat d'estudiar el comportament de l'acer ASIN 301LN, s'ha fet un anàlisi amb l'objectiu de conèixer els efectes produïts en el material per les diferents variables que intervenen en el procés de brunyit.

Per caracteritzar el comportament de l'acer estudiat, en les condicions de recuit (R) i de laminat en fred amb un contingut del 38% de martensita (L40), s'han realitzat a cada làmina quatre mostres compostes de cinc ratlles en diferents condicions, les quals s'han fet amb l'eina de brunyir. Cada mostra està formada per cinc ratlles, separades entre elles a una distància de 5 mm i realitzades aplicant forces diferents de: 100, 200, 300, 400 i 500 N. Dos d'aquestes mostres de ratlles s'han fet sense vibració en l'eina de brunyir, en una d'elles s'han traçat en la direcció de laminat i l'altre en la direcció perpendicular al laminat. En canvi, els dos grups restants s'han fet amb vibració, mantenint les mateixes direccions que els grups anteriors. La vibració de l'eina funciona a una freqüència de 40 kHz i una amplitud del 100% (10 micres).

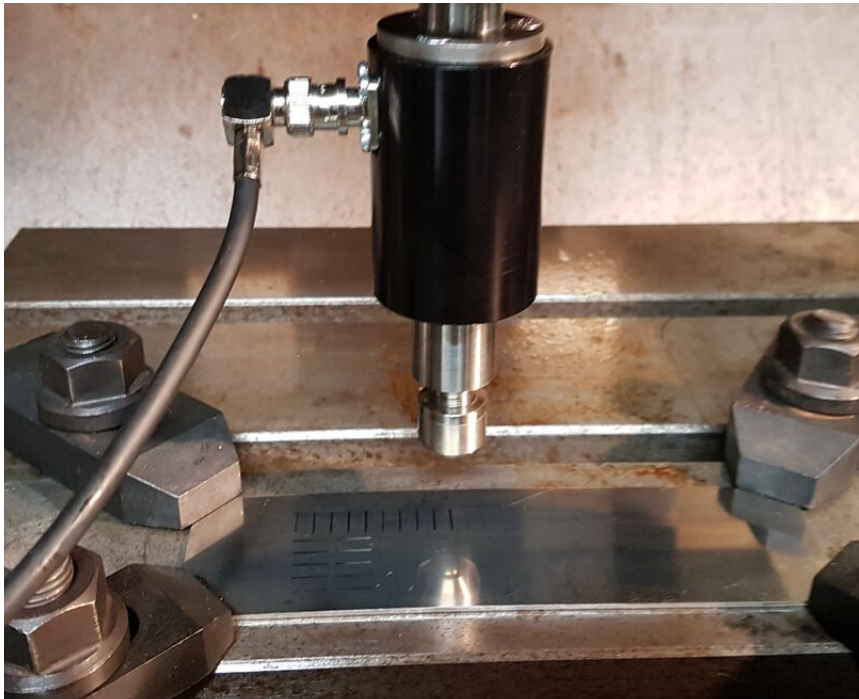


Figura 2.5. Grups de ratlles brunyides en diferents condicions sobre la superfície de la placa L40.

Un cop finalitzades les ratlles en ambdues plaques, s'ha emprat el rugosímetre per a la lectura i l'estudi de les petjades creades en la superfície del material. Aquest aparell utilitza una font de llum com a eina de lectura superficial, el qual ens permet trobar un perfil de la superfície en funció de com reflecteixi la llum i el representa gràficament amb

el programa “Surface Map”. Posteriorment, les lectures s’han analitzat amb el programa informàtic “SPIP”, el qual ens permet obtenir dades com l’alçada de la petjada, la seva amplada i l’alçada dels apilaments. A més, aquest mateix programa ens dóna la possibilitat de dur a terme un anàlisi detallat de la rugositat superficial de cada una de les mostres. S’han realitzat un total de 10 assajos per mostra, a fi d’obtenir resultats més fiables.

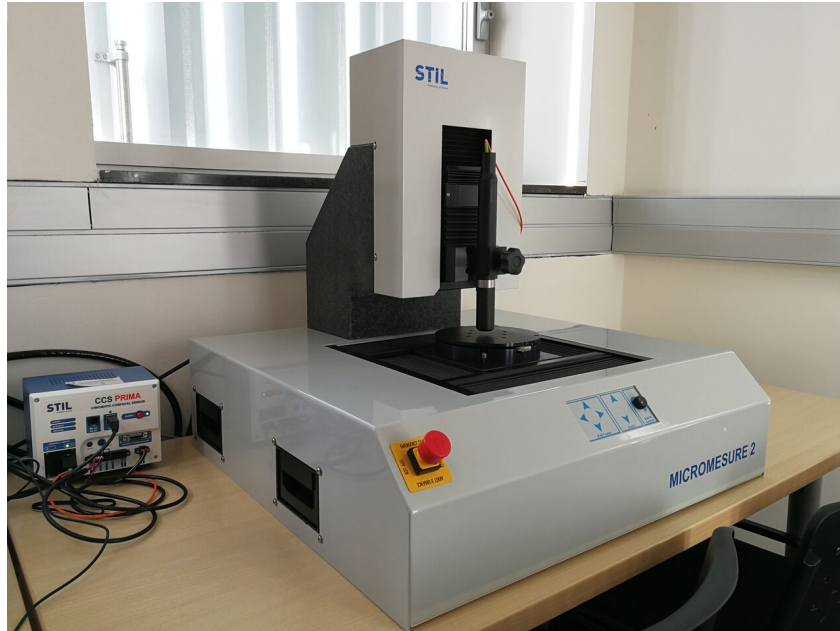


Figura 2.6. Rugosímetre Micromesure 2 de STIL.

Amb la finalitat d’agilitzar i fer més comprensible la lectura dels resultats obtinguts, s’ha estipulat una nomenclatura concreta per definir les diferents condicions que s’han aplicat en els assajos i detallar correctament tota la informació que conté cada assaig. A continuació s’explica la nomenclatura escollida amb el significat detallat de cada referència:

- **R/L40_SV/AV_TOTES_L/P** → On R/L indiquen si l’acer s’ha laminat en condicions de recuit (R) o laminat en fred (L), el 40 representa el % de deformació en fred, els acrònims SV/AV senyalen si l’eina de brunyir s’ha emprat sense vibracions (SV) o amb vibracions (AV), TOTES significa que cada lectura conté les 5 ratlles realitzades amb totes les forces i per acabar, L/P indiquen el traçat de les ratlles que l’eina de brunyir ha realitzat en direcció del laminat (L) o en la direcció perpendicular al laminat (P).

2.3.1. MiniTab

La caracterització del comportament del material enfront les diferents variables que s’han decidit aplicar, també s’ha dut a terme paral·lelament a aquest projecte en làmines

amb condicions de laminat en fred amb un contingut del 10% (L10) i 18% (L20) [30], realitzant el mateix procediment exposat prèviament per tal d'obtenir una caracterització més contrastada d'aquest acer en qüestió.

Únicament s'ha decidit comparar i estudiar la influència de les diferents condicions de brunyit en funció de les alçades mesurades en les petjades, degut a que l'amplada manifesta un comportament molt similar al de l'alçada però amb influències menys significatives.

Per realitzar dita comparació s'ha emprat un programa anomenat MiniTab. Aquest software d'ordinador està dissenyat per executar funcions estadístiques bàsiques i avançades. Un cop s'han introduït totes les dades obtingudes de les mostres en el programa, aquest ens permet obtenir gràficament les interaccions les diferents condicions de brunyit entre elles i respecte l'alçada de les petjades.

2.3.2. Variables del procés de brunyit definitives

Al finalitzar la caracterització del material, s'han pres les següents decisions per a la realització de les noves petjades que es volen estudiar:

- Les petjades es fan amb unes dimensions de 10x10 mm, mantenint les dues condicions de vibració (SV i AV) degut a que existeix la possibilitat de mostrar modificacions a nivell microestructura, tot i no presentar variacions a nivell superficial.
- En referència a les forces de brunyit, s'ha vist que descriuen una relació lineal i per això aplicarem només la força de 500N, ja que amb aquesta s'obtenen resultats més significatius i són proporcionals al resta de forces.
- Existeix una lleugera influència a l'hora de realitzar les passades en direcció perpendicular o paral·lela a la direcció del laminat, per aquest motiu mantindrem ambdues condicions a l'hora de realitzar les noves petjades.
- Les noves petjades es realitzaran en les condicions esmentades prèviament i amb un paràmetre addicional, el número de passades en el procés de brunyit, les quals podran ser una o cinc passades.
- Es farà servir una nomenclatura modificada on s'inclourà les noves característiques : *R/L10/L20/L40_SV/AV_L/P_1/5*, on 1/5 ens indica en quantes passades s'ha realitzat la petjada de brunyit, una o cinc passades.

2.4. Tractament superficial de brunyit

El tractament superficial de brunyit s'ha dut a terme en les instal·lacions de la universitat EEBE, emprant la fresadora CNC amb una eina de brunyir descrita anteriorment en l'apartat 1.5.3.

Prèviament s'ha desenvolupat un programa CNC, per fixar totes les variables del procés i que la fresa traci els moviments desitjats. Tot seguit, s'han realitzat a cada làmina un total de vuit assajos en forma de quadrat, on cada un d'ells reuneix diferents condicions del procés prèviament seleccionades. Els resultats a simple vista dels assajos es poden observar en la mostra de la figura 2.7.



Figura 2.7. Mostra R amb quadres assajats en diferents condicions de brunyit.

Els paràmetres que s'han esmentat abans influeixen directament en el tractament de brunyit que s'ha realitzat a cada mostra, per aquest motiu és important seleccionar les condicions de treball en que es realitzarà l'assaig:

- Càrrega aplicada = 500N
- Número de passades = 1 i 5
- Dimensions petjada = 10 x 10 cm
- Pas lateral = 0,3 i 0,4 mm

A més d'aquests paràmetres, també entren en joc varies condicions que es volen estudiar per veure el seu efecte sobre el material i analitzar les variacions en les propietats físiques i mecàniques que aquest pot sofrir. S'han efectuat petjades en la direcció del laminat i en la direcció perpendicular al laminat, combinat amb l'eina funcionant amb vibració i sense ella.

2.5. Preparació de les mostres

Un cop tallades les mostres i extret el material sobrant, és indispensable marcar-les per tal de tenir un control exhaustiu i un correcte seguiment al llarg de tot el projecte. Seguidament les provetes es netegen en un bany d'acetona i ultrasons per eliminar les impureses que puguin tenir, així com les restes de greix de les mans i brutícia, durant 15 minuts.

Les mostres s'han marcat per una banda sobre la superfície de la proveta amb retolador permanent, afegint una petita osca que permet identificar les mostres que s'han brunyit amb una passada; i d'altra banda s'han classificat les provetes, segons les condicions de brunyit que reuneixen, en bossetes de plàstic marcades d'acord amb la nomenclatura establerta anteriorment: R (2B) o L40 (C1250) i les diferents condicions, tal i com es mostra en la següent figura.



Figura 2.8. Bossetes de plàstic classificatòries.

La neteja de les mostres s'ha realitzat mitjançant una màquina d'ultrasons *Selecta* (figura 2.9). Per assegurar una bona neteja s'han submergit les mostres en un vas de precipitats amb acetona, tot seguit aquest es col·loca durant 15 minuts dins del bany d'ultrasons per aconseguir que s'eliminin totes les impureses de la superfície de la mostra. Aquest procés s'ha fet en els casos oportuns just abans de portar les mostres a l'interferòmetre i al SEM.



Figura 2.9. Màquina d'ultrasons Selecta.

Amb l'objectiu d'analitzar la duresa en la superfície de la petjada de brunyit, s'han tallat les mostres transversalment, és a dir, perpendicular a la direcció en la que s'ha brunyit la petjada. S'ha fet servir un equip que permet tallar amb precisió les mostres amb un disc de diamant que gira a 4000 rpm i amb una velocitat d'avanç de 6 mm/min, paràmetres que ens recomana emprar el fabricant en acers inoxidable per a un tall òptim. L'aparell de tall que s'ha emprat és l'*IsoMet-4000* de la marca *Buehler*, com el que es mostra a la figura 2.10

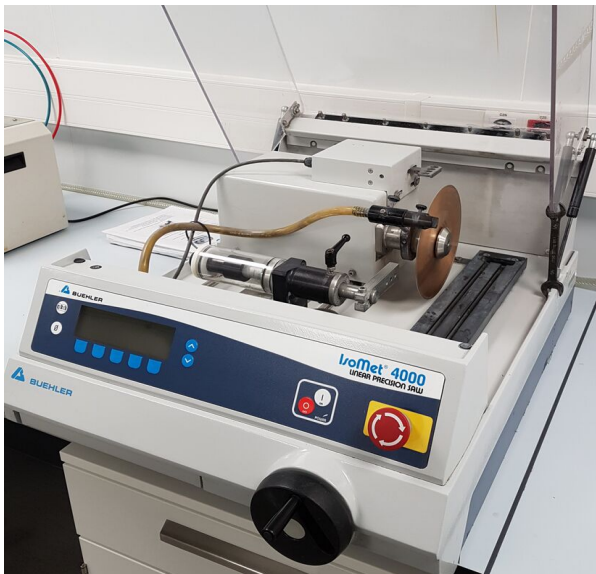


Figura 2.10. Talladora IsoMet-4000.



Figura 2.11. Mostres R_AV/SV_L/P_5 tallades.

Una vegada s'han tallat i per tal de treballar en bones condicions, les provetes s'han encastat amb baquelita dura (figura 2.12) de la marca *DuroFast Struers*. La màquina utilitzada per encastar les mostres és la *LaboPress-3* de la marca *Struers*, la qual podem veure a la figura 2.13.

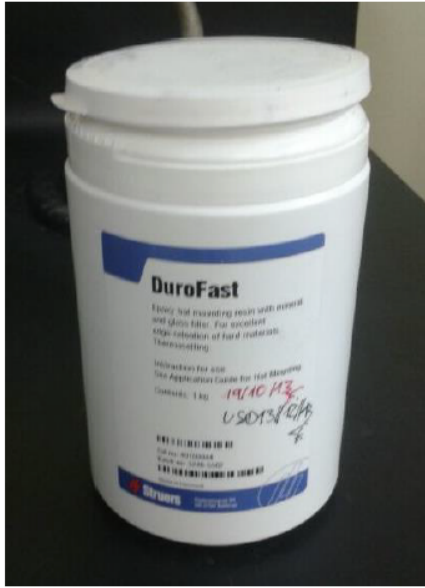


Figura 2.12. Baquelita emprada.



Figura 2.13. Màquina d'encastar mostres.

Per tal de poder analitzar i realitzar les microindentacions en la zona més propera a la superfície de la secció transversal de les mostres, s'ha dut a terme un muntatge determinat per encastar les mostres que es representa a la figura 2.14. Amb aquest muntatge em aconseguir tenir identificada la superfície brunyida en totes les mostres i disminuir significativament l'efecte contorn, que no permet analitzar zones molt properes a la superfície degut a l'arrodoniment de les vores en les etapes de desbast i polit. Finalment s'obtenen provetes de 30 mm de diàmetre i 12 mm d'espessor.

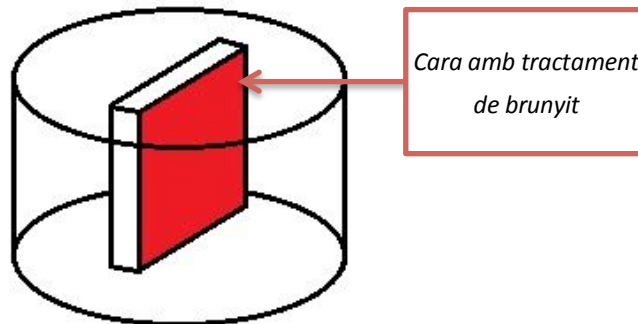


Figura 2.14. Representació esquemàtica de com s'han encastat les mostres.

Després d'encastar les mostres s'han tornat a marcar amb un marcador amb punta de metall dur (Co-WC), com el de la figura 2.15, sobre la baquelita i mantenint la mateixa nomenclatura. Aquest cop s'ha afegit al final de cada identificador el nombre de passades que s'han realitzat sobre la proveta (1 o 5).



Figura 2.15. Marcador amb punta de metall dur.

Per finalitzar el procés de preparació de mostres, s'ha executat un tractament de desbast i polit mitjançant una polidora manual com la que es mostra a la figura 2.16. En la fase de desbast s'han utilitzat 5 papers de desbast diferents, variant 90° la direcció de polit de la mostra entre cada paper. Els següents papers de desbast són els que s'han emprat en aquest tractament:

- P80 (μm)
- P320 (μm)
- P600 (25 μm)
- P1200 (15 μm)
- P2500 (μm)



Figura 2.16. Polidora manual Buehler Alpha de dos velocitats.

El polit es duu a terme en una polidora manual amb plat magnètic *LaboPol-5* de la marca *Struers*, emprant draps i aplicant sobre d'ells solucions de partícules de diamant de 6 i 3 μm . El resultat final que s'obté de les mostres recent polides es pot veure a la següent figura.



Figura 2.17. Mostra encastada, marcada i polida.

2.6. Caracterització de la superfície

2.6.1. Rugositat

El concepte de rugositat superficial s'utilitza per definir l'estat d'irregularitat de la superfície d'un material, on trobem valls i pic d'amplitud variable que mesurant-los s'obté els valors de rugositat, els quals caracteritzen la topografia de la superfície. Els sistemes més utilitzats per quantificar aquesta magnitud es basen en el registre de perfils d'altures mitjançant un rugosímetre o perfilòmetre [24]. L'aparell que s'ha emprat en aquest cas és el rugosímetre *Micromesure 2* de *STIL* com el que es mostra a la figura 2.6.

Tal com s'explica anteriorment a l'apartat 2.3, el mecanisme d'aquest aparell utilitza un focus de llum com a eina de lectura superficial. El lector d'aquest equip es desplaça sobre la superfície de la mostra a una velocitat constant i en dues direccions (X i Y) formant un quadrat, aquests paràmetres es determinen mitjançant el software de control. La llum del lector a mesura que va trobant variacions d'alçades es reflecteix amb diferents intensitats, les quals interpreta el software de control "Surface Map" i les converteix en una representació gràfica de la silueta amb les irregularitats superficials registrades. El programa "SPIP" ens permet visualitzar els pics i les valls en una representació superficial (3D) i finalment ens calcula, amb la informació obtinguda, els paràmetres de rugositat que desitgem extreure:

- S_a (Arithmetical mean height) és la mitjana aritmètica dels valors absoluts de les diferents alçades $y(x)$ de cada punt, mesurades a partir d'una superfície determinada.
- S_q (Root mean square height) és la representació del valor del quadrat mitjà de l'arrel dels valors ordenats dins de l'àrea de definició. Aquest equival a la desviació estàndard de les altures.

- **S_v** (Maximum pit height) és el valor absolut de la profunditat de la vall més gran dins de l'àrea definida.
- **S_p** (Maximum peak height) és l'alçada del pic més alt dins de l'àrea definida.
- **Std** (Texture direction) ens representa la direcció de la textura de la superfície.
- **Ssk** (Skewness) dóna els valors que representen el grau de iaix de la forma de rugositat (aspor).
- **Sku** (Kurtosis) ens mesura la brusquedat del perfil rugós, podent-la interpretar segons els següents intervals:
 - Sku < 3 → la distribució de l'alçada es distingeix una mica per sobre del pla mitjà.
 - Sku = 3 → la distribució de l'alçada és normal. Coexisteixen porcions agudes i indentades.
 - Sku > 3 → la distribució de l'alçada és punxeguda.

La tècnica de no contacte que empra aquest sistema ens dóna una caracterització de perfils en dos dimensions i superfícies en tres dimensions. Els seus objectius interferomètrics disposen d'un divisor de feix que envia part de la llum a la superfície de la mostra i l'altre part a un mirall de referència. La reflexió de la llum en ambdues superfícies es recombina formant bandes d'interferència que són recollides en una càmera CCD. Per a cada punt de la mostra existeix una distància entre l'objectiu i la mostra, la qual proporciona l'enfocament idoni i que està definit per la intensitat màxima de pic en les bandes d'interferència. A partir d'un escombrat vertical es localitzen els diferents punts d'enfocament per a cada part de la mostra, de manera que es genera una mapa tridimensional de la superfície amb una resolució sub-nanomètrica en l'eix vertical.

Amb aquest instrument ens hem centrat en mesurar i estudiar l'estat superficial de les mostres que reuneixen les següents condicions de brunyit: sense vibració (SV), direcció del brunyit perpendicular al laminat (P), amb una i cinc passades (1/5). S'ha realitzat aquesta selecció de petjades a estudiar, amb la finalitat d'observar com varia la rugositat superficial en funció del nombre de passades de brunyit. Atès que no existeix cap diferència significativa en aplicar vibració al procés de brunyit o la direcció en que s'ha realitzat aquest, tal i com hem pogut comprovar prèviament en l'apartat 2.3.2.

Els passos que s'han seguit per mesurar la rugositat superficial de totes les mostres escollides són els següents:

1. Encendre el rugosímetre, els seus controladors i posteriorment l'ordinador.
2. Executar el programa "Surface Map".
3. Col·locar la mostra damunt del porta mostres, de manera que la llum verda que emet la punta de l'instrument de mesura quedi sobre el punt de partida desitjat per analitzar la mostra.

4. Calibrar l'alçada (eix Z) del lector fins obtenir un valor d'intensitat entre el 30% i el 90%, el qual podem veure en una de les barres que ens mostra el programa de control.
5. Realitzar amb l'opció *Leveling* un anivellament de la superfície del porta mostres, per tal de deixar la superfície de la mostra a estudiar el menys inclinada possible.
6. Introduir els paràmetres de mesura desitjats (distància i sentit dels eixos X i Y, pas, velocitat d'avanç, etc.).
7. Realitzar la mesura de la superfície, sense pertorbar l'equip.
8. Guardar els resultats obtinguts d'altitud i intensitat en els formats d'arxiu adequats per poder-los analitzar posteriorment amb el programa de tractament de dades "SPIP".

2.6.2. Microscopi òptic confocal

El microscopi òptic confocal és un instrument, complementat per mètodes electrònics i de computació, que basa el seu funcionament en seleccionar només la llum del pla focal d'interès i elimina la llum reflectida o fluorescent procedent dels plans no enfocats. Així doncs, ens permet enfocar plans determinats de la mostra i controlar la profunditat de camp. A la següent figura es pot veure un esquema del seu funcionament. [25]

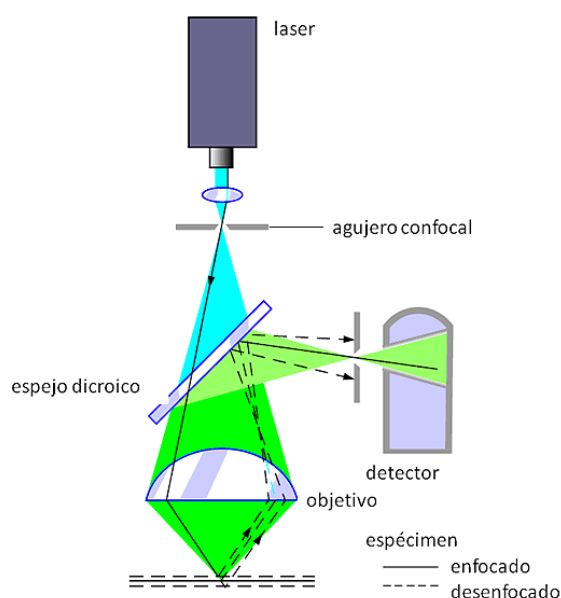


Figura 2.18. Principi de funcionament de la microscòpia òptica confocal. [25]

Aquesta tècnica de microscòpia és molt popular arran de les imatges que s'obtenen amb major resolució, nitidesa i contrast. A més, permet realitzar talls òptics fins a mostres de teixits més o menys gruixuts i realitzar reconstruccions tridimensionals a partir de talls seriat. Per a obtenir la informació completa, el raig làser ha de ser desplaçat per tota la superfície de la mostra, a aquest procés se'l coneix com escaneig o rastreig. El microscopi òptic confocal utilitzat en el present projecte ha estat un *Olympus Lext* (figura 2.19).

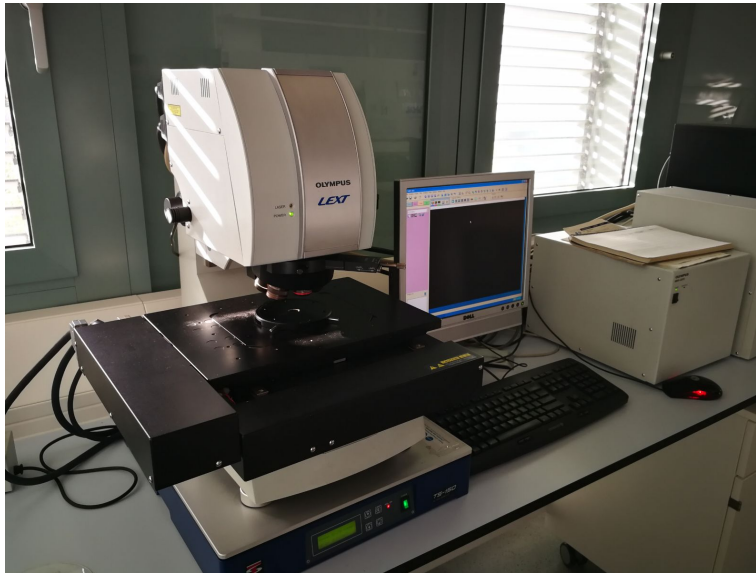


Figura 2.19. Microscopi òptic confocal Olympus Lext.

2.6.3. *Microscopi òptic de rastreig (SEM)*

Per analitzar els possibles mecanismes de desgast que s'hagin pogut crear durant el tractament de brunyit, s'utilitza el microscopi electrònic de rastreig que és un mètode per obtenir imatges d'alta resolució de superfícies.

El SEM (Scanning Electron Microscopy) o microscopi òptic de rastreig es considera la millor i més apropiada eina per detectar i analitzar mecanismes de fractura en la superfície d'un material, gràcies a la seva gran profunditat de camp. Aquest instrument és un tipus de microscopi electrònic que basa el seu funcionament en projectar un feix d'electrons d'alta energia (0,1 – 30 keV) contra la mostra, això fa que interactuïn amb els àtoms de la mostra i es generi unes senyals que el microscopi interpreta (figura 2.20). Un detector mesura la quantitat d'electrons reflectits per la mostra i el programa s'encarrega de traduir aquestes senyals produint una imatge, sent capaç d'oferir resolucions entre 3 i 20 nm. [26]

Per garantir el bon funcionament del microscopi, és necessari que la mostra sigui conductora, estigui completament neta i la cambra on s'ubica quedi al buit. Així els electrons projectats, no es podran desviar per la presència de molècules d'aire, i tindran energia suficient per interaccionar amb la superfície del material.

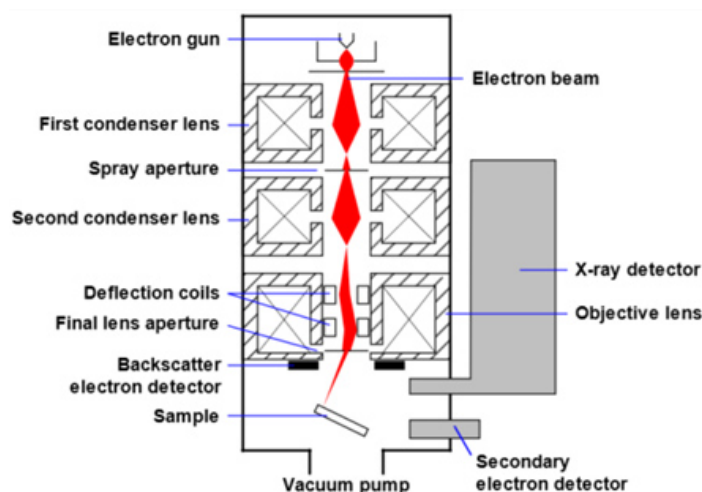


Figura 2.20. Esquema de funcionament del microscopi electrònic de rastreig (SEM). ^[26]

El microscopi òptic de rastreig emprat en aquest projecte és el *Phenom XL* de la marca *PHENOMWORLD*, com el que es mostra a la figura 2.21. Aquest consta d'una cambra que permet l'anàlisi de mostres grans fins a 100x100 mm. A més, compta amb una resolució per sota dels 14 nm, un factor d'amplificació de 80 fins a 100.000 augments i una energia de feix d'electrons de 5 fins a 20 keV.



Figura 2.21. Microscopi electrònic de rastreig Phenom XL.

2.6.4. Interferòmetre

Es tracta d'un aparell òptic que amb diversos mètodes aprofiten el fenomen d'interferència de les radiacions electromagnètiques per diferents tipus de mesures. L'interferòmetre és un instrument que empra diferents la interferència de les ones de llum per mesurar amb gran precisió longituds d'ona de la mateixa llum.

Existeixen molts tipus d'interferòmetres, tots ells utilitzen dos feixos de llum que recorren dos trajectòries òptiques diferents, determinades per un sistema de miralls i prismes que, finalment, convergeixen per formar un patró d'interferència (figura 2.22).

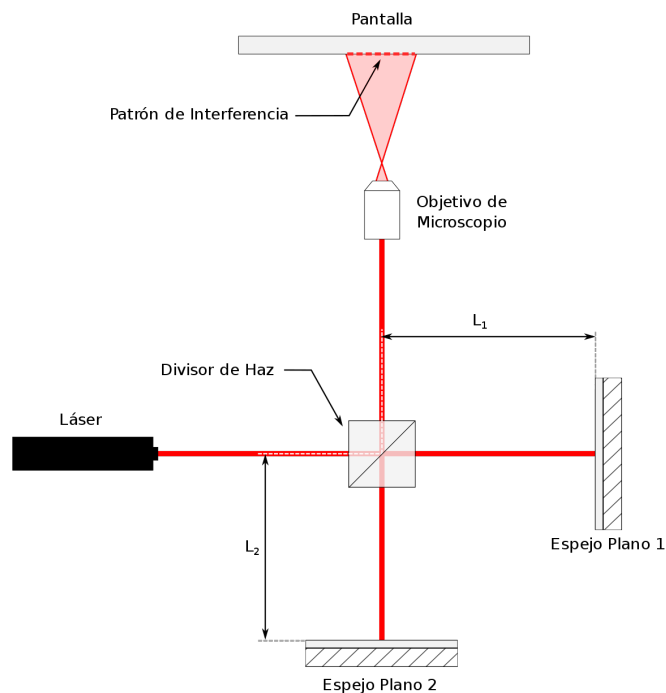


Figura 2.22. Esquema de funcionament de l'interferòmetre. ^[27]

Per mesurar la longitud d'ona d'un raig de llum monocromàtica es fa servir un interferòmetre, disposat de manera que un mirall situat en la trajectòria d'un dels feixos de llum pot desplaçar-se una distància petita, podent-se mesurar amb precisió, i fent possible la modificació de la trajectòria òptica del feix. Quan el mirall es desplaça una distància igual a la meitat de la longitud d'ona de la llum, es produeix un cicle complet de canvis en les franges d'interferència. La longitud d'ona es calcula mesurant el nombre de cicles que tenen lloc quan es mou el mirall una distància determinada. [27]

En el present projecte s'ha utilitzat l'interferòmetre *Wyko NT 9300* de la marca *Veeco*, com el que s'observa a la figura 2.23. Aquest equip permet la realització de mesures topogràfiques en tres dimensions, sense contacte, i amb una resolució nanomètrica. La mesura del camp de visió és de 8,45 mm. La resolució del equip en l'eix vertical és inferior a 0,01 nm i el rang de mesura vertical és de 0,1 nm fins a 10 mm. [28]

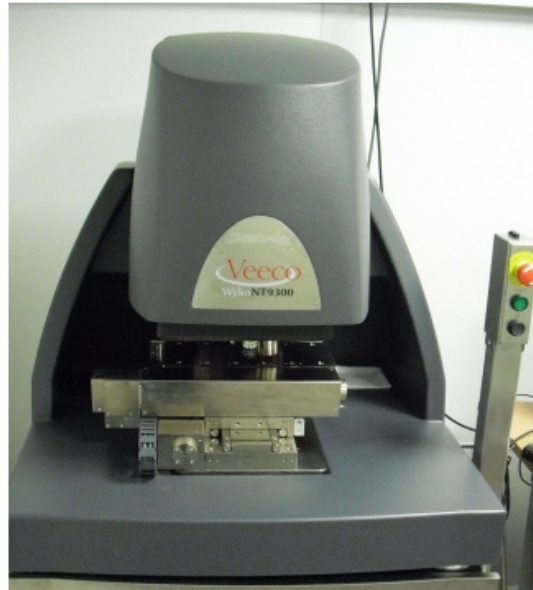


Figura 2.23. Interferòmetre Wyko NT 9300. [28]

2.7. Caracterització mecànica

2.7.1. Microduresa

En aquesta etapa utilitzarem el microduròmetre, que és un instrument amb el qual obtenim mesures de la duresa d'un material. L'assaig de duresa és senzill i un dels més emprats en la selecció i control dels metalls. S'avalua convencionalment mesurant la resistència a la penetració d'una eina de determinada geometria.

Els mètodes existents per a la mesura de la duresa principalment es distingeixen per la forma geomètrica de l'eina (penetrador), per les condicions d'aplicació de la càrrega i per la pròpia forma de calcular la duresa. Alhora de seleccionar el mètode de determinació de la duresa es tindrà en compte els següents factors: tipus, dimensions i gruix de la mostra. En concret, el tipus d'assaig mecànic que realitzarem serà el Vickers. Aquest mètode és molt difós perquè permet mesurar la duresa pràcticament en tots els materials metàl·lics, independentment de l'estat en què es trobin i del seu espessor. [29]

El procediment Vickers utilitza un penetrador de diamant en forma de piràmide amb base quadrada. El penetrador és aplicat perpendicularment a la superfície que conté la duresa que es desitja mesurar, sota l'acció d'una determinada càrrega **P**. Aquesta es manté durant un cert temps, després del qual es retira i es mesura les diagonals **d₁** i **d₂** de la impressió que queda sobre la superfície del material (figura 2.24). Les cares oposades de la piràmide formen un angle de 136°, per tant, al ser un angle obtús la profunditat de la indentació és petita, caracteritzant així aquest tipus d'assaig com no destructiu.

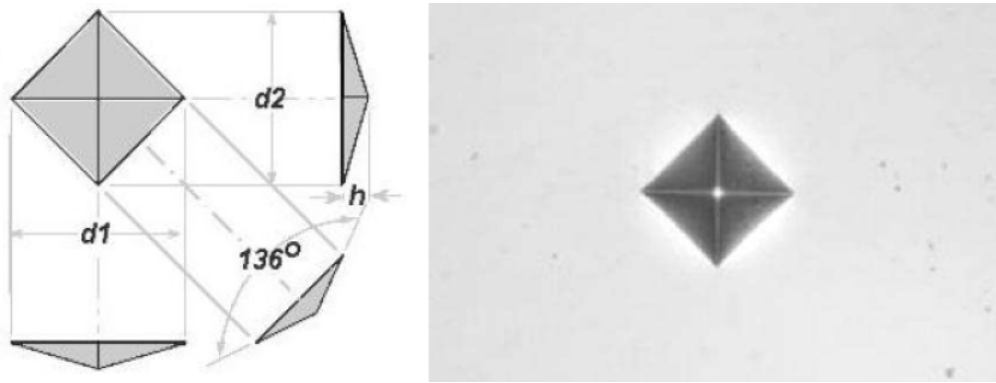


Figura 2.24. Indentador a l'esquerra i indentació a la dreta. ^[29]

La duresa Vickers (HV) ve donada per la càrrega, el temps d'aplicació d'aquesta, i pel càlcul s'emptra la superfície de la indentació, que ve donada per la seva diagonal.

$$HV = \frac{1,854 \cdot P}{L^2} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$L = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (\text{Eq. 1.5})$$

- HV és el valor de la duresa Vickers.
- P és el valor de la càrrega aplicada (kg).
- d_1 i d_2 són les longituds de les diagonals de la indentació (mm).

L'equip que s'ha fet servir per realitzar les microindentacions és el microduròmetre *Buehler* (figura 2.25), amb un penetrador piramidal Vickers de diamant. Els assajos de duresa s'han dut a terme aplicant una càrrega de 500g durant 10s. Aquest aparell disposa de tres objectius de 10, 50 i 100 augments per poder observar les indentacions, així com un nònius incorporat per a mesurar les diagonals d'aquestes.

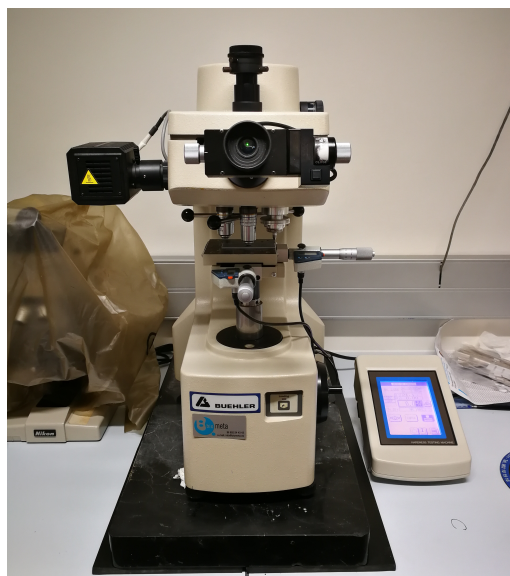


Figura 2.25. Microduròmetre Buehler emprat.

Prèviament a la mesura de les mostres, ha sigut necessari calibrar el microduròmetre amb l'objectiu d'obtenir la màxima precisió en els resultats. En la primera fase de calibratge s'han realitzat un sèrie de proves sobre un regle nanomètric (figura 2.26), amb el qual s'ha comparat amb diferents objectius (x10, x50 i x100) les línies del sistema de mesura de l'aparell amb les línies de distància del patró. En aquest procediment hem obtingut una corba de calibratge amb dos valors que corregeixen l'error visual.



Figura 2.26. Regle nanomètric (patró) amb línies de distància.

En la segona fase s'han dut a terme diverses indentacions sobre la superfície d'un patró d'acer, amb una duresa de 700HV (figura 2.27). Aquesta etapa de calibratge consisteix en fer 10 microindentacions i mesurar les seves diagonals, realitzades amb una càrrega aplicada de 100g i un temps d'indentació de 10s, a fi d'obtenir aproximadament el valor de duresa que ens marca el fabricant, i d'aquesta manera validar els valors obtinguts en la primera fase.



Figura 2.27. Material patró de 700HV.

Una cop finalitzat el procés de calibratge del microduròmetre, s'ha realitzat una matriu de microindentacions. Aquesta està constituïda per cinc indentacions en línia i separades, repetides en diferents distàncies respecte la superfície. Això fa que tinguem cinc mesures de duresa per a cada profunditat establerta: a 20µm, 50µm, 80µm, 120µm, 175µm, 250µm, 400µm i 600µm de la superfície.

La metodologia que s'ha seguit per mesurar la duresa de cada una de les mostres ha esta la següent:

1. Encendre el microduròmetre.
2. Encendre l'ordinador i executar les plantilles d'Excel on s'introduiran posteriorment les mesures de les diagonals i es calcularà la mitjana de les dureses.
3. Seleccionar l'objectiu de x50 augments i una càrrega de 50 grams en el microduròmetre.
4. Col·locar la mostra sobre el porta mostres de manera que la secció transversal de la mostra quedi horitzontal a la base i perpendicular al penetrador.
5. Baixar suaument l'objectiu del microduròmetre fins que gairebé estigui a tocar la superfície de la mostra, però sense arribar a tocar-la, i ascendir progressivament fins que quedi ben enfocada la imatge.
6. Localitzar amb l'objectiu el límit de la superfície de la petjada, zona on es troba amb la baquelita, i centrar-se a un punt mig desplaçant amb el nònius els eixos X i Y.
7. Situar el penetrador a 20 micres de la superfície, per tal de començar les indentacions a l'interior de la petjada.
8. Realitzar 5 microindentacions a la mateixa distància de la superfície per a cada profunditat. Entre les indentacions d'una mateixa línia es deixa una distància mínima superior a la diagonal de la indentació, per tal de que aquesta no es vegi afectada per la indentació anterior.
9. Mesurar les diagonals de totes i cada una de les petjades i anotar-les a un full d'Excel que calcula la duresa Vickers mitjançant l'equació 2.1.
10. Fotografiar amb el microscopi òptic confocal les matrius de microindentacions de les diferents mostres.

CAPÍTOL 3:

RESULTATS I DISCUSSIÓ

3.1. Resultats de la selecció de variables del brunyit

Per poder seleccionar les variables del brunyit, amb les quals s'ha treballat al llarg de tot el projecte, per a la realització de les petjades, s'han emprat dos mètodes diferents d'anàlisi de dades. Per una banda s'ha fet servir l'Excel, per obtenir una representació gràfica dels valors absoluts en els diferents materials i condicions de brunyit, respecte la força aplicada en el procés. D'altra banda, s'ha utilitzat el programa MiniTab, per aconseguir una visió general de la interacció entre totes les condicions que han intervingut en el brunyit, i la influència que han tingut cadascuna d'elles.

3.1.1. Representació numèrica dels resultats

La representació gràfica dels resultats obtinguts, s'ha dut a terme mitjançant un càlcul de la mitjana dels 10 assajos de cada mostra i la seva desviació estàndard, per tal de disposar d'un únic valor per a cada condició. En les següents taules 3.1 i 3.2 es mostren els resultats dels paràmetres analitzats en les làmines R i L40:

	Forces (N)	Alçada (μm)	Amplitud (mm)
R_SV_TOTES_L	100	$2,5775 \pm 0,429$	$0,40005 \pm 0,009$
R_SV_TOTES_P		$3,691 \pm 0,094$	$0,46245 \pm 0,011$
R_AV_TOTES_L		$3,448 \pm 0,097$	$0,4356 \pm 0,003$
R_AV_TOTES_P		$4,5315 \pm 0,187$	$0,46215 \pm 0,009$
R_SV_TOTES_L	200	$5,28 \pm 0,063$	$0,5364 \pm 0,004$
R_SV_TOTES_P		$7,276 \pm 0,102$	$0,564 \pm 0,007$
R_AV_TOTES_L		$5,484 \pm 0,061$	$0,56625 \pm 0,003$
R_AV_TOTES_P		$7,2985 \pm 0,13$	$0,61305 \pm 0,004$

R_SV_TOTES_L	300	$7,9735 \pm 0,126$	$0,64575 \pm 0,003$
R_SV_TOTES_P		$9,383 \pm 0,09$	$0,69225 \pm 0,002$
R_AV_TOTES_L		$7,86 \pm 0,061$	$0,6471 \pm 0,003$
R_AV_TOTES_P		$9,7815 \pm 0,133$	$0,65985 \pm 0,005$
R_SV_TOTES_L	400	$10,135 \pm 0,069$	$0,7275 \pm 0,005$
R_SV_TOTES_P		$10,315 \pm 0,201$	$0,76365 \pm 0,004$
R_AV_TOTES_L		$10,41 \pm 0,096$	$0,7368 \pm 0,005$
R_AV_TOTES_P		$11,705 \pm 0,334$	$0,76035 \pm 0,012$
R_SV_TOTES_L	500	$12,69 \pm 0,074$	$0,8034 \pm 0,003$
R_SV_TOTES_P		$13,475 \pm 0,202$	$0,81435 \pm 0,003$
R_AV_TOTES_L		$12,62 \pm 0,163$	$0,8079 \pm 0,005$
R_AV_TOTES_P		$15,975 \pm 0,17$	$0,8637 \pm 0,005$

Taula 3.1. Mesures d'alçada i amplada de la placa d'acer R.

	Forces (N)	Alçada (μm)	Amplitud (mm)
L40_SV_TOTES_L	100	$0,51715 \pm 0,06$	$0,21165 \pm 0,014$
L40_SV_TOTES_P		$1,1535 \pm 0,097$	$0,33705 \pm 0,025$
L40_AV_TOTES_L		$0,53895 \pm 0,034$	$0,36555 \pm 0,015$
L40_AV_TOTES_P		$0,501 \pm 0,031$	$0,3273 \pm 0,008$
L40_SV_TOTES_L	200	$0,97325 \pm 0,047$	$0,25905 \pm 0,011$
L40_SV_TOTES_P		$1,58 \pm 0,038$	$0,3903 \pm 0,011$
L40_AV_TOTES_L		$0,65995 \pm 0,06$	$0,4131 \pm 0,008$
L40_AV_TOTES_P		$0,7748 \pm 0,041$	$0,45165 \pm 0,009$

L40_SV_TOTES_L	300	1,173 ± 0,055	0,4041 ± 0,007
L40_SV_TOTES_P		1,6765 ± 0,042	0,47115 ± 0,01
L40_AV_TOTES_L		1,9445 ± 0,071	0,51045 ± 0,01
L40_AV_TOTES_P		1,169 ± 0,059	0,49635 ± 0,012
L40_SV_TOTES_L	400	2,1985 ± 0,06	0,507 ± 0,008
L40_SV_TOTES_P		3,2345 ± 0,047	0,56085 ± 0,004
L40_AV_TOTES_L		2,7655 ± 0,06	0,5358 ± 0,007
L40_AV_TOTES_P		2,433 ± 0,081	0,5676 ± 0,006
L40_SV_TOTES_L	500	2,717 ± 0,043	0,59745 ± 0,006
L40_SV_TOTES_P		4,447 ± 0,06	0,64245 ± 0,006
L40_AV_TOTES_L		4,335 ± 0,328	0,59385 ± 0,004
L40_AV_TOTES_P		3,3965 ± 0,096	0,61665 ± 0,009

Taula 3.2. Mesures d'alçada i amplada de la placa d'acer L40.

3.1.2. Representació gràfica amb MiniTab

Per a l'obtenció d'una representació gràfica de la interacció i la influència de les condicions que s'han emprat en el procés de brunyit, s'ha introduït numèricament en el programa les taules anteriors, incloent totes les làmines d'acer (R, L10, L20 i L40). Amb totes les dades recollides prèviament amb l'Excel, i amb l'ajuda del MiniTab, obtenim gràficament les interaccions de cada una de les variables de brunyit entre elles respecte l'alçada de les petjades (figura 3.1).

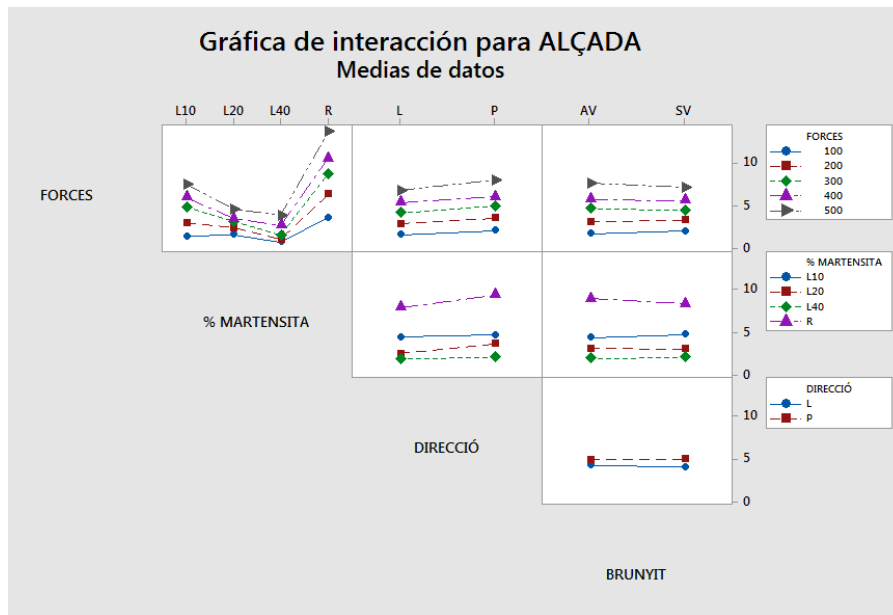


Figura 3.1. Gràfica d'interacció de les diferents condicions de brunyit en funció de l'alçada.

Tot seguit, s'ha realitzat una altre representació gràfica que ens mostra, de manera intel·ligible, els efectes que produeixen cada una de les condicions sobre els valors absoluts per l'alçada de la petjada, i per tant ens mostra la influència que tenen per separat (figura 3.2).

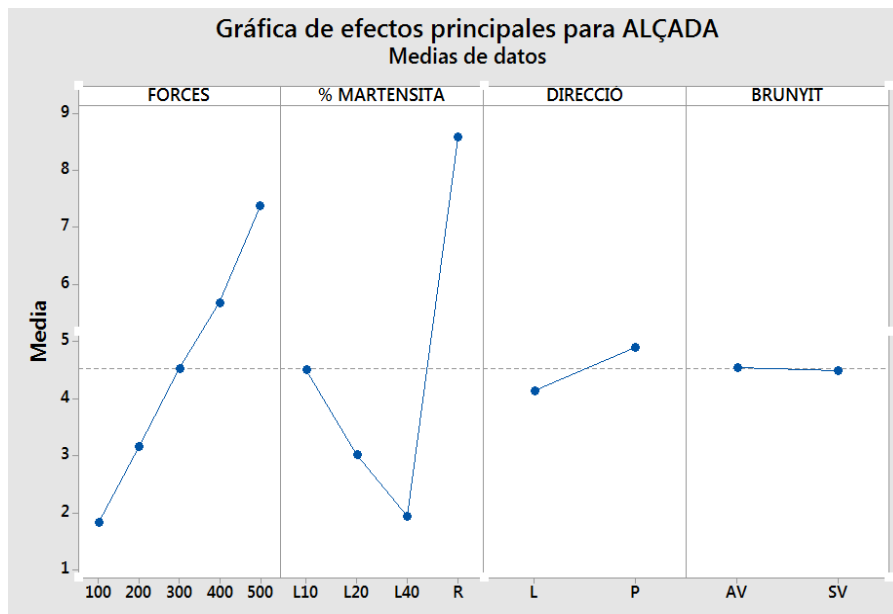


Figura 3.2. Gràfica de l'efecte de cada condicions de brunyit sobre l'alçada.

3.1.3. Observacions en el comportament de l'acer

Amb la comparació dels resultats obtinguts de les quatre làmines d'acer, en les respectives condicions de recuit i laminat, es pot observar com es comporta el material treballat enfront les diferents condicions de brunyit que s'han aplicat en aquesta primera etapa de caracterització.

En general s'observa que existeix una relació lineal en les forces, a l'aplicar una força més elevada de brunyit s'aconsegueixen valors més grans de les petjades mesurades. Per aquest motiu, es decideix treballar el brunyit amb una força de 500N, degut a que els resultats són més significatius i proporcionals a la resta de forces. A més, si comparem els resultats de les plaques amb diferents continguts de martensita, es veu clarament com a mesura que augmenta el percentatge de martensita els valors de l'alçada són més baixos.

També es pot observar que hi ha una lleugera influència alhora de realitzar les passades en la direcció perpendicular o paral·lela al laminat, ja que en la direcció perpendicular els valors de la petjada es veuen una mica més afectats que en la direcció paral·lela.

Per últim, hem descobert que a nivell superficial, el fet de brunyir amb vibració no presenta cap efecte destacable sobre les mostres. Aplicant la tècnica de brunyir amb vibració o sense ella, s'assoleixen pràcticament els mateixos resultats.

3.2. Anàlisi superficial de les petjades

3.2.1. Resultats de la Microscòpia òptica confocal

L'observació detallada de la superfície de les mostres, amb les condicions esmentades en l'apartat 2.6.1. exceptuant les realitzades en una passada, permet analitzar l'efecte originat pel procés de brunyir. Hem obtingut amb el microscopi imatges normals i imatges mitjançant la tecnologia confocal de les diferents superfícies, utilitzant augments de x10, x20 i x50.

S'ha comparat la superfície de la làmina en estat de recuit (R) amb la làmina composta per un 38% de fase inicial de martensita (L40), ambdues després de dur a terme les petjades amb la tècnica de brunyit amb bola. L'objectiu principal, és observar com es produeixen diferents efectes sobre la superfície de les dues làmines, en funció de la duresa que presenten aquestes. Cal recordar que entre els dos materials hi ha una diferència d'aproximadament un 35% de contingut en martensita inicial.

En les següents figures es pot observar, que en les dues làmines es pot distingir clarament la direcció que ha traçat la bola de brunyir sobre la superfície del material. Entre elles es poden apreciar diferències significatives en les superfícies brunyides. D'una banda, la

làmina R ha sofert una evolució més important respecte l'estat de la làmina original, desapareixent gairebé totes les fronteres de grans i originant-se una espècie d'apilaments en forma d'aigües, com si la bola hagués estirat o arrossegat el material. Això es deu a la seva baixa duresa, és a dir, com es tracta d'un material més tou es deforma més. D'altra banda, en la làmina L40 no s'observen modificacions significatives respecte l'estat original, tan sols s'aprecia una oxidació més pronunciada i ens deixa una superfície més plana i ben definida. En termes visuals, aquesta comparació ens demostra que quanta menys duresa té una superfície, més transformada es veurà al ser brunyida.

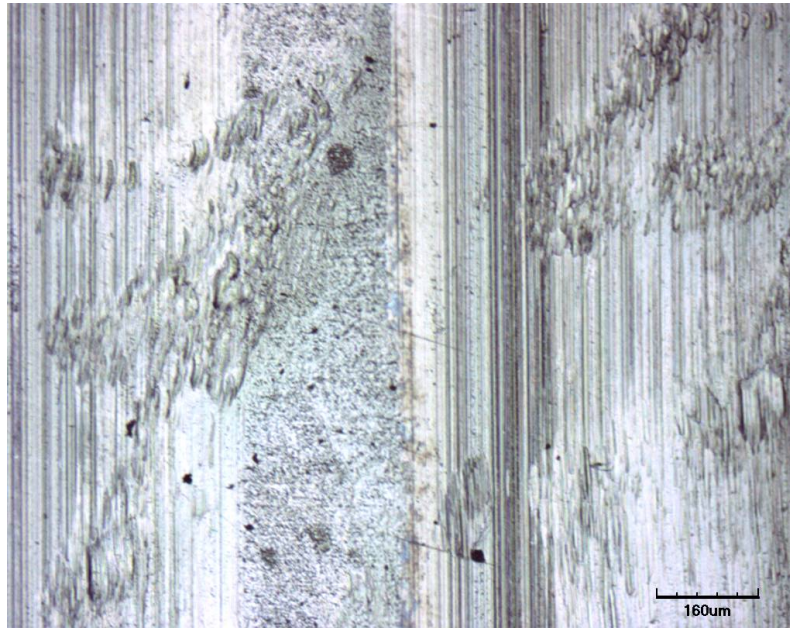


Figura 3.3. Dany en la superfície de la mostra R.

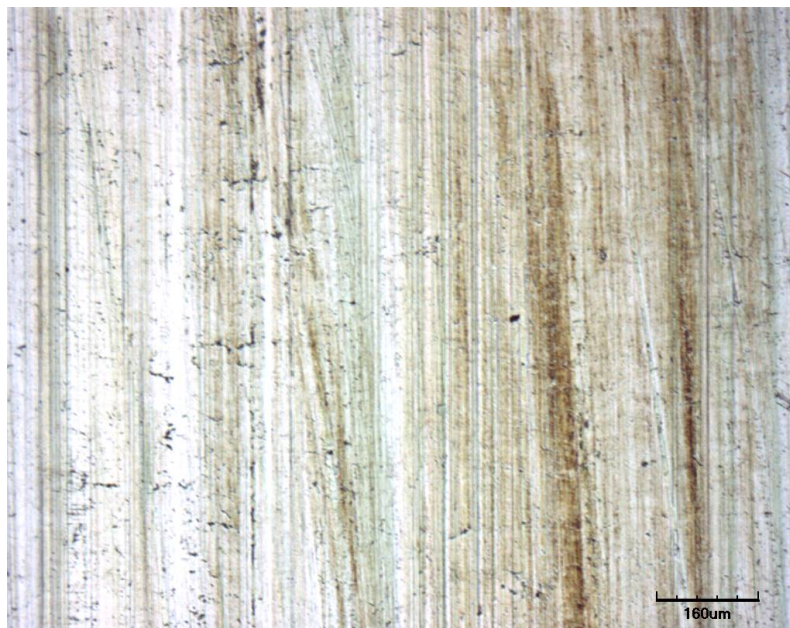


Figura 3.4. Dany en la superfície de la mostra L40.

Fent ús de la tecnologia òptica confocal, podem discernir clarament en una fotografia els pics i valls creats en les petjades. Ja que si no la utilitzem, les diferents alçades en les que es troben aquests ens dificulta enfocar els dos punts en una sola imatge. Aquesta tècnica també posa de manifest les diferències entre el comportament de l'acer recuit i el laminat.

Les següents imatges (figura 3.5 i 3.6) manifesten amb color blanc les zones més profundes i en color negre les zones més altes. Podem reconèixer una quantitat d'alts i baixos més abundant en la superfície de la làmina de recuit (R), degut a que té menys duresa. Així com un gran nombre de zones en les que es poden identificar arrossegament del material. En canvi, en la làmina que presenta un 38% de martensita (L40), es veuen més clars i definits els pics i valls originats pel pas de la bola de brunyir, però no es veuen arrossegaments.

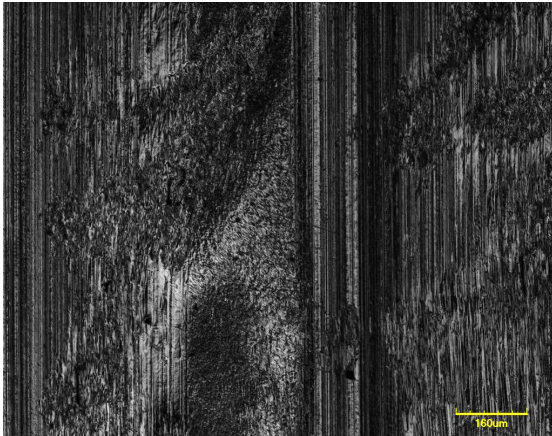


Figura 3.5. Mostra de la làmina R.

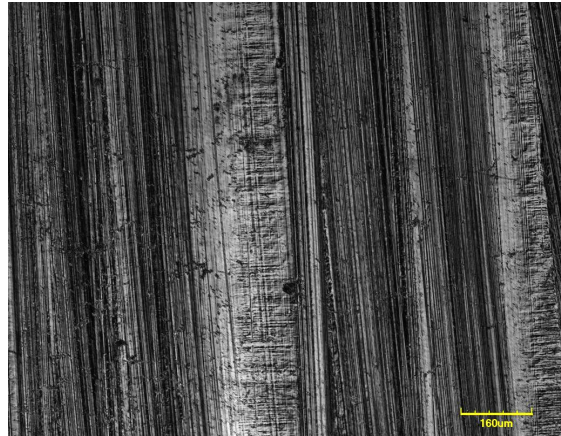


Figura 3.6. Mostra de la làmina L40.

Les demés fotografies que s'han pres a les mostres de les làmines amb un 10% de fase inicial de martensita (L10) i un 18% (L20), les quals s'han estudiat en un altre projecte [30], es troben a l'Annex A.1.1.

3.2.2. Resultats del Rugosímetre 3D

Per analitzar la rugositat superficial de les mostres hem fet servir com a instrument principal el rugosímetre 3D anomenat a l'apartat 2.6.1. En la presa de mesures s'han afegit les de les làmines en condicions originals, sense aplicar el procés de brunyit, i s'ha creat una imatge en tres dimensions amb una superfície de mesura de 6x6 cm per a cada mostra.

Comparant les superfícies recreades en 3D de les làmines R i L40, podem observar com en el material de recuit es pronuncien més les irregularitats superficials. Tot i així, trobem

un efecte cíclic, al ser un material més mal·leable i tou es crea amb una passada nous pics i valls, però, quan es realitzen cinc, el material es va redistribuint en cada passada, i en conseqüència s'aplanen aquests pics i valls, refent-los i millorant la superfície.

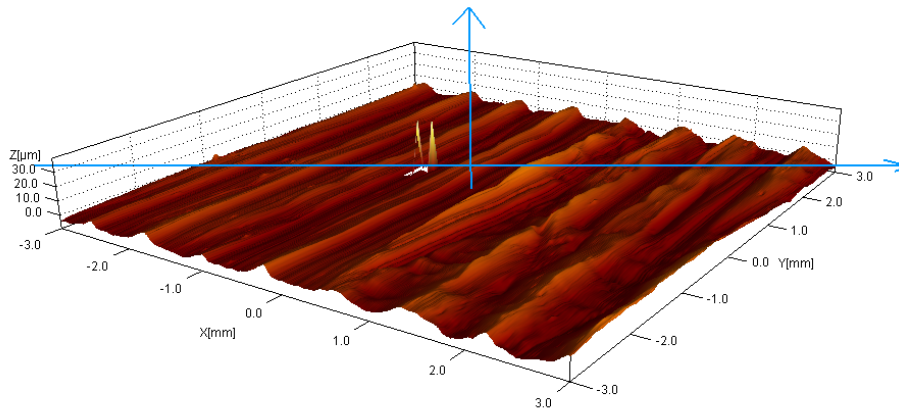


Figura 3.7. Superfície 3D de la rugositat de la mostra R_SV_P_5.

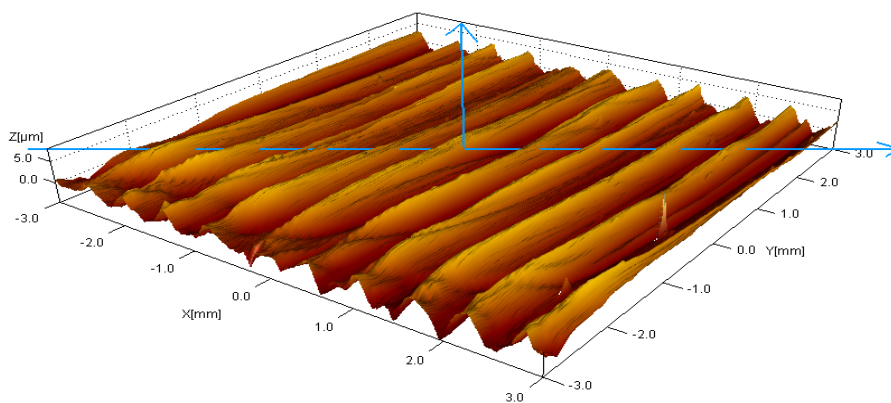


Figura 3.8. Superfície 3D de la rugositat de la mostra R_SV_P_5.

A diferència de l'anterior, la làmina L40 té una rugositat més baixa i presenta unes irregularitats més definides i marcades. Aquesta té una rugositat molt semblant a la de la làmina amb un 18% de contingut de martensita, ambdues presenten uns valors més baixos respecte les làmines R i L10. Això ens dona a entendre que les superfícies de les làmines L20 i L40 s'han originat pics i valls menys pronunciats degut a que posseeixen una duresa més elevada, mentre que les superfícies de les làmines R i L10 s'han deformat de manera més pronunciada ja que són més toves.

A fi d'obtenir un estudi més precís envers les característiques superficials que presenta cada mostra, s'ha realitzat un registre de les dades de rugositat que tenen les diferents petjades (taula 3.3) mitjançant les dades estadístiques explicades a l'apartat 2.6.1.

Làmina	$S_a (\mu m)$	$S_a (\mu m)$	$S_a (\mu m)$	$S_a (\mu m)$	Std (°)	Ssk	Sku
R_O	0,349	0,4644	5,0488	12,396	90,056	0.4615	19.649
R_SV_P_1	2,9388	3,6452	15,35	19,131	89,586	0.4869	3.0273
R_SV_P_5	2,2014	2,7698	9,3879	39,446	89,84	0.6124	6.0274
L10_O	0,14559	0,2243	5,0952	6,9063	89,266	-1.0347	58.424
L10_SV_P_1	1,6154	1,9647	16,412	6,299	87,503	0.4106	2.5832
L10_SV_P_5	1,9122	2,3754	5,965	7,6617	87,192	0.5103	2.8726
L20_O	0,1469	0,1906	2,6055	3,3496	86,914	0.2629	8.1816
L20_SV_P_1	0,7389	0,91235	4,7138	3,5572	77,316	-0.3039	2.8545
L20_SV_P_5	1,0223	1,3263	7,4248	9,5398	88,401	0.1204	3.8992
L40_O	0,0764	0,1079	1,0966	2,7307	88,256	1.9367	34.863
L40_SV_P_1	0,9061	1,071	3,1582	3,5278	98,289	-0.0365	2.1705
L40_SV_P_5	1,557	1,8762	4,6349	7,9922	89,867	0.3664	2.3239

Taula 3.3. Resultats estadístics superficials de les mostres.

Juntament amb l'elaboració de la taula 3.3 s'han recreat les superfícies en 3D de totes les mostres que no s'han mostrat en aquest apartat. Aquestes es poden veure a l'Annex A.2.I.

De forma numèrica es pot observar en els valors de rugositat, com l'efecte d'aplicar el brunyit amb cinc passades, produeix una superfície més rugosa que amb una sola passada, exceptuant el cas de la làmina de recuit (R). Degut a que al tractar-se d'una lamina més tova, tal i com s'ha comentat anteriorment, les cinc passades redistribueixen la superfície aplanant els pics i valls, però creant d'altres menys pronunciats i millorant les irregularitats. Fet que no succeeix en les làmines que tenen més fase marenítica inicial, que en aquest cas es necessita més d'una passada per deixar una marca més significativa.

L'estudi de la rugositat superficial també s'ha realitzat en un segon instrument de mesura, amb l'objectiu de verificar els resultats obtinguts amb el rugosímetre. En aquest cas, hem obtingut amb l'interferòmetre perfils de rugositat de cada petjada. Al tractar-se d'un anàlisi d'un perfil de la mostra, els resultats que s'aconsegueixen són menys

qualitatius que els obtinguts en la mesura d'una superfície. Per aquest motiu considerem més fiables les rugositats que hem mesurat amb el rugosímetre 3D.

En les següents figures s'observa els perfils de rugositat analitzats de les mostres realitzades sense vibració i en direcció perpendicular al laminat. També ens mostren els valors R_a i R_q , corresponents a les alçades del perfil mesurat, els quals difereixen una mica dels resultats anteriors.

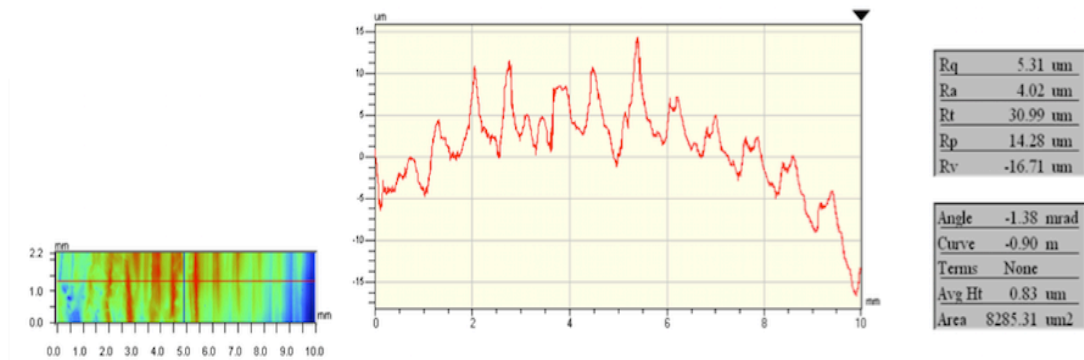


Figura 3.9. Perfil de rugositat de la mostra R_SV_P_5.

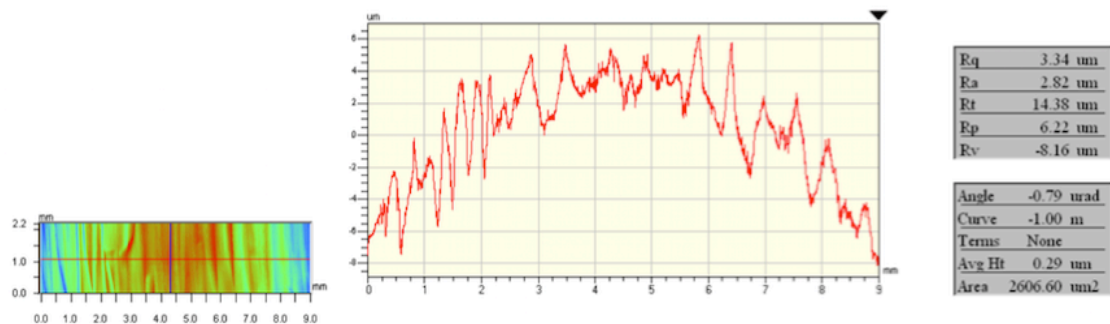


Figura 3.10. Perfil de rugositat de la mostra L40_SV_P_5.

3.2.3. Resultats del microscopi electrònic de rastreig

En les imatges que hem adquirit amb el SEM de la superfície de les petjades, no s'han detectat grans diferències en comparació amb el que s'ha observat a l'apartat 3.2.1. El motiu principal pel qual s'ha decidit utilitzar el microscopi electrònic de rastreig, ha estat l'obtenció d'imatges amb grans augments i més focalitzades a les valls de les petjades, per poder observar amb més detall l'estat superficial en el camí seguit per la bola de brunyir.

En primer lloc, s'ha estudiat la superfície resultant produïda sense vibració i brunyida en la direcció perpendicular al laminat, sent aquestes les condicions més crítiques, per a una i cinc passades en la làmina de recuit (R). Aquesta làmina ens permet veure amb més nitidesa el dany superficial provocat pel tractament, degut a que és la que presenta una duresa més baixa. Les figures 3.11 i 3.12 mostren, respectivament, unes valls força semblants entre si, no obstant, la petjada realitzada amb una passada es veu menys polida, amb apilaments més pronunciats; en canvi, la mostra realitzada amb cinc passades mostra una marca més polida i amb apilaments no tan diferenciats.

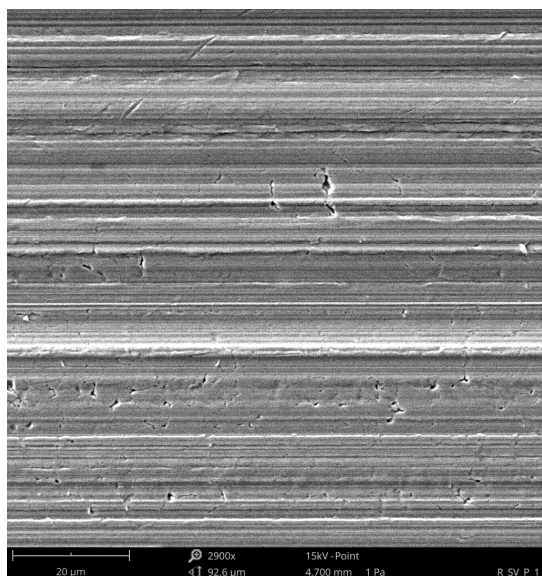


Figura 3.11. Superfície de la vall de la làmina R amb una passada.

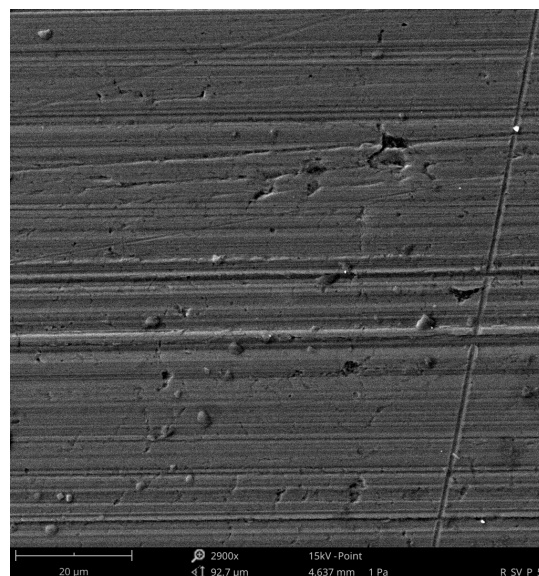


Figura 3.12. Superfície de la vall de la làmina R amb cinc passades.

En segon lloc, s'han comparat les marques originades pel tractament de brunyit, que s'ha aplicat amb cinc passades, en la làmina de recuit i la martensítica amb un 38% de contingut de martensita. Aquesta comparació ens facilitat extreure resultats més evidents, degut a que són els dos extrems oposats del nostre estudi. Observant les imatges, podem veure que a la làmina R hi ha una presència d'irregularitats més gran, a més, els danys produïts en la superfície d'aquesta làmina estan estirats en la direcció de la bola (figura 3.13); mentre que en la làmina L40 no es veuen marques tan agressives (figura 3.14).

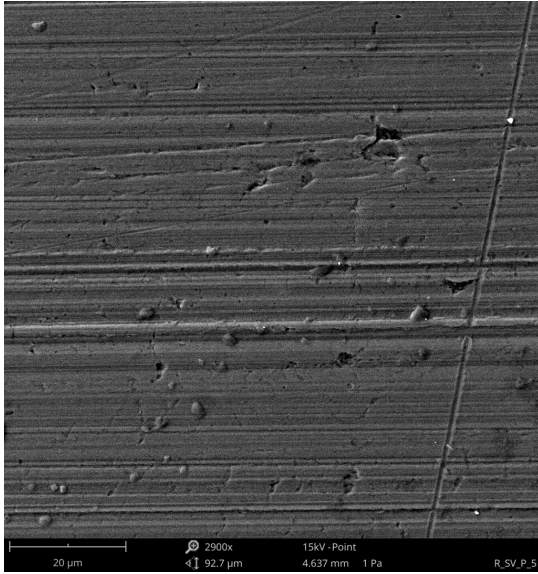


Figura 3.13. Superfície de la vall de la làmina R amb cinc passada.

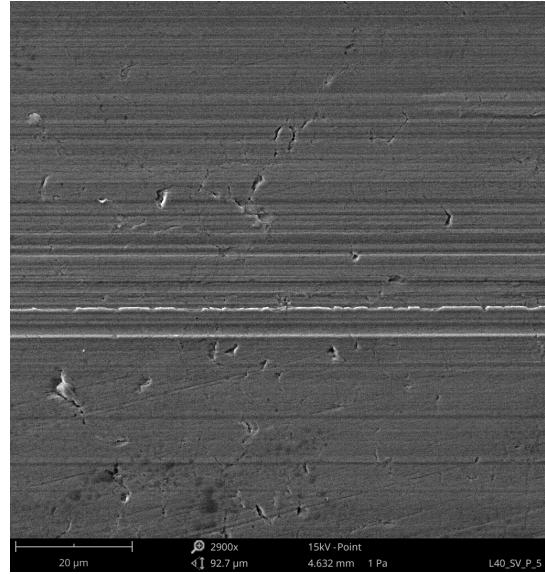


Figura 3.14. Superfície de la vall de la làmina L40 amb cinc passades.

3.3. Anàlisi de la microduresa de les petjades

Per analitzar l'evolució de la duresa en la superfície de la petjada produïda pel procés de brunyit, s'han realitzat assajos per als dos materials d'acer (R i L40) sobre la secció transversal de les petjades amb les condicions de vibració, direcció de brunyit i només cinc passades. S'ha decidit estudiar les petjades realitzades en cinc passades perquè s'aconsegueix un efecte superior, en comparació amb una passada, sobre la variació de la duresa, per tant obtindrem més informació.

La metodologia que s'ha seguit per dur a terme la matriu d'indentacions a cada mostra que s'analitza, és l'esmentada en l'apartat 2.7.1. En la següent figura, es mostra una imatge representativa de la matriu realitzada des de la superfície cap a l'interior del material.

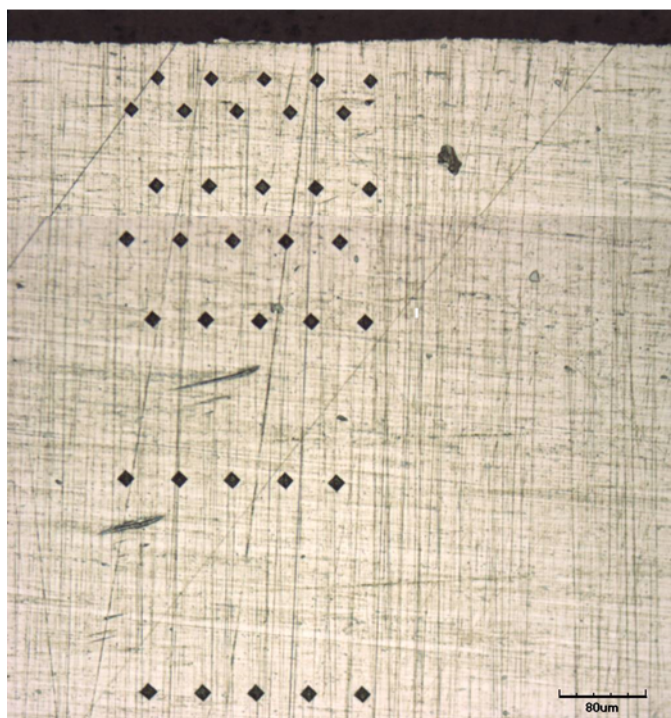


Figura 3.15. Matriu d'indentacions feta a la secció transversal de la làmina L10. [30]

Per entendre els resultats que s'han obtingut en l'anàlisi dels perfils de duresa, es necessari comentar i comprendre que les dureses originals dels materials estudiats, anomenades en l'apartat 2.1.4, estan referenciades a la superfície d'aquests. On trobem zones de grans més amples i les seves fronteres més separades (figura 3.16). Ara bé, les indentacions s'han realitzat damunt la secció transversal de les làmines, per tant, les dureses analitzades en aquesta zona del material seran sempre més elevades, ja que les zones de grans són més fines i estirades amb els seus límits de grans molt junts (figura 3.17).

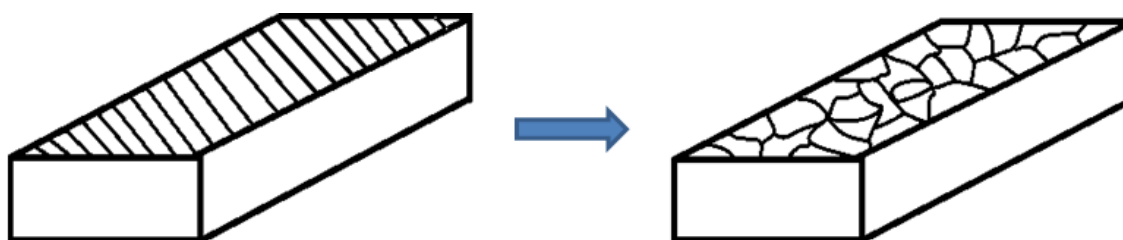


Figura 3.16. Distribució dels grans en la superfície d'un acer laminat.



Figura 3.17. Distribució dels grans en la secció transversal d'un acer laminat.

3.3.1. Perfil de dureses

- **Acer R**

En la figura 3.18, s'exposa el perfil de dureses de la làmina en estat de recuit (R), amb valors obtinguts per a cada condició de brunyit a diferents profunditats. Es pot observar que no hi han diferències significatives entre els valors de duresa adquirits per als assajos realitzats amb les diferents condicions que s'estudien. Tenint en compte que el valor s'estabilitza a 250HV, gairebé a la profunditat on es troba el nucli de la peça (500-600 μm), cal destacar que l'efecte del brunyit sobre la superfície al llarg de l'assaig provoca un increment de duresa per als primers 400 μm , assolint fins a un valor de 460HV. Aquest increment suposa un augment de la duresa en superfície de més del 60%, en comparació amb la duresa original de l'acer previ al tractament. Aquest augment de la duresa tant pot ser conseqüència de la transformació de fase d'austenita a martensita, així com del propi enduriment dels grans austenítics.

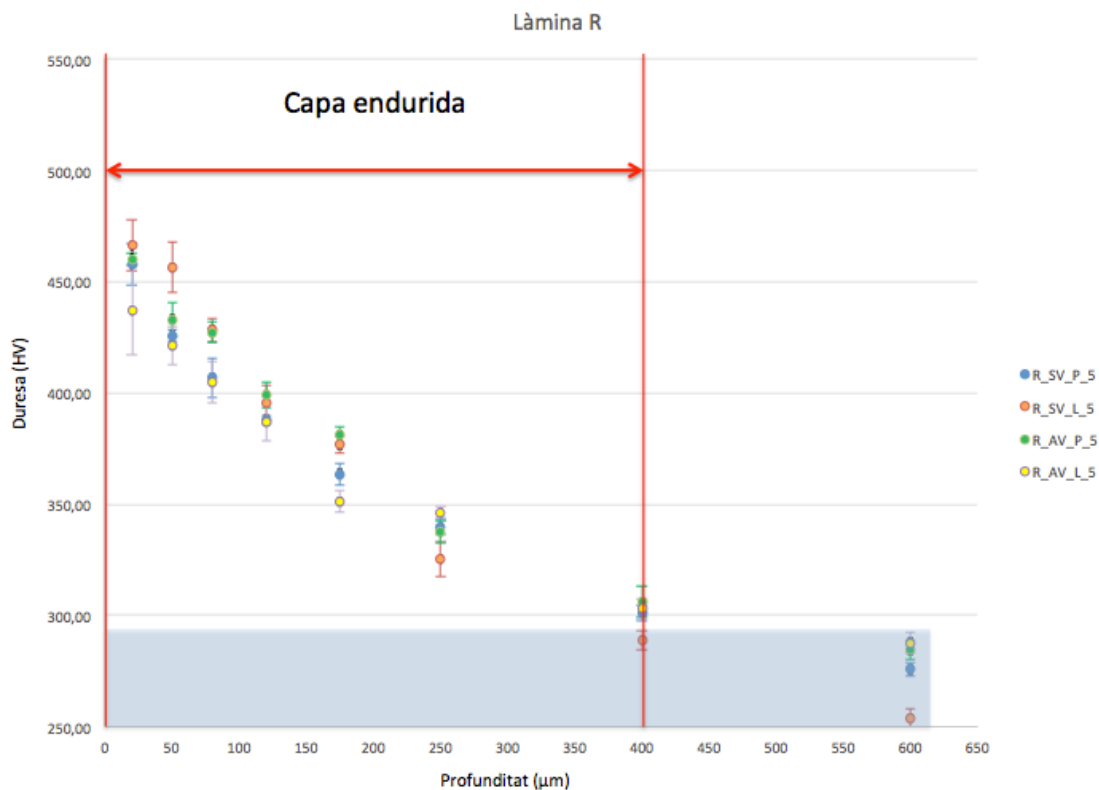


Figura 3.18. Perfil de dureses de la làmina R per a cada condició de brunyit.

- **Acer L40**

En aquest cas, s'identifiquen algunes diferències entre els valors de duresa adquirits per a les diferents condicions assajades. Per a les petjades brunyides en la direcció perpendicular al laminat, s'assoleix un valor de la duresa més superficial

d'aproximadament 520HV, però per a les brunyides en la direcció paral·lela al laminat la duresa més superficial és d'uns 450HV. També s'observa que la capa endurida és més prima que la làmina anterior, la qual ens indica que l'efecte del brunyit ha causat un augment de la duresa en els primers 80 µm. Considerant que la duresa s'estabilitza a la zona del nucli de la làmina (aproximadament 600 µm de profunditat), podem afirmar que el valor estable és 450HV. La duresa d'aquesta làmina s'ha vist incrementada en un 15% respecte la duresa original.

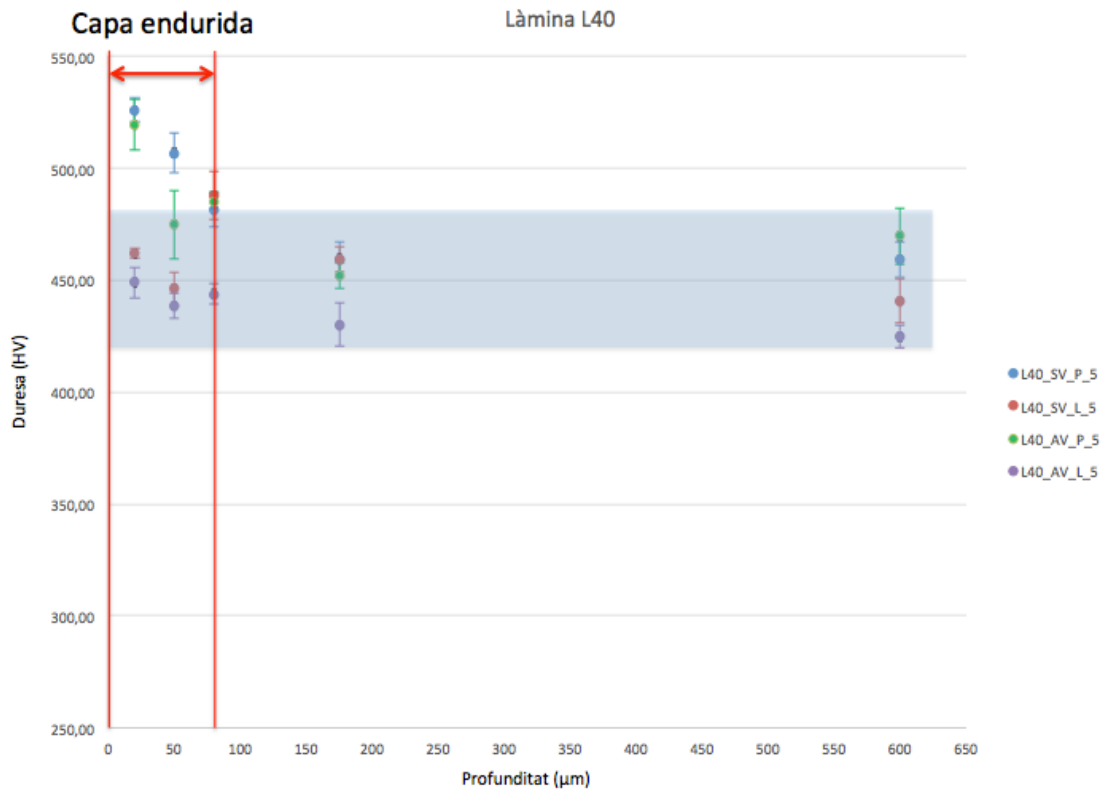


Figura 3.19. Perfil de dureses de la làmina L40 per a cada condició de brunyit.

- **Comparativa dels perfils de dureses per als diferents tipus d'acers i condicions de brunyit**

D'una banda s'observa que no existeix un clar efecte en la condició d'aplicar el tractament de brunyit amb o sense vibració, generalment es nota que no té una influència directe sobre la duresa resultant de la làmina, per contra, sembla haver-hi una repercussió diferent alhora de brunyir paral·lela o perpendicularment al laminat, ja que en aquesta última condició els valors de duresa s'incrementen. Els valors numèrics de totes les mostres analitzades es poden veure amb més detall a les taules de l'Annex A.3.I, on es pot realitzar una comparació numèrica de les dureses de les làmines, incloses la L10 i L20 que s'han estudiat en un projecte paral·lel [30].

D'altra banda, s'ha revelat que a major contingut de martensita inicial en la làmina, menys espessor tindrà la seva capa endurida. Aquesta experimenta un increment molt menys significatiu respecte la seva duresa original, en comparació a la que experimenta una làmina amb baix contingut de martensita inicial. En la següent taula, es reuneixen els diferents espessors de capa endurida per a totes les mostres en les condicions més crítiques i, consegüentment, on els resultats són més significatius:

Làmina i condicions	Capa endurida (μm)
R_SV_P_5	400
L10_SV_P_5	250
L20_SV_P_5	80
L40_SV_P_5	80

Taula 3.4. Espessors de la capa endurida de cada làmina.

Finalment, s'ha fet un gràfic on es comparen tots els perfils de dureses de cada làmina amb les condicions més crítiques que hem vist fins ara: brunyit sense vibració, en la direcció perpendicular al laminat i amb cinc passades.

En aquest gràfic (figura 3.20) es contempla com la làmina L10 presenta un comportament similar al de la làmina R, mentre que la làmina L20 manifesta un comportament quasi idèntic al de la làmina L40. Evidentment, les làmines que posseeixen una duresa inicial més elevada, aconseguixen uns valors de duresa més elevats que la resta després del brunyit, tot i això, els increments que experimenten no són tant importants com els de les làmines amb una duresa inicial més baixa (taula 3.5). Això es reflecteix en la profunditat que assoleix la capa endurida de cada material. Així doncs, podem afirmar que quant menys contingut de martensita inicial presenta una làmina, l'efecte del tractament de brunyit tindrà més influència sobre l'increment de la duresa, aconseguint valors de duresa pròxims als d'una làmina amb més contingut de martensita inicial sense brunyir-la.

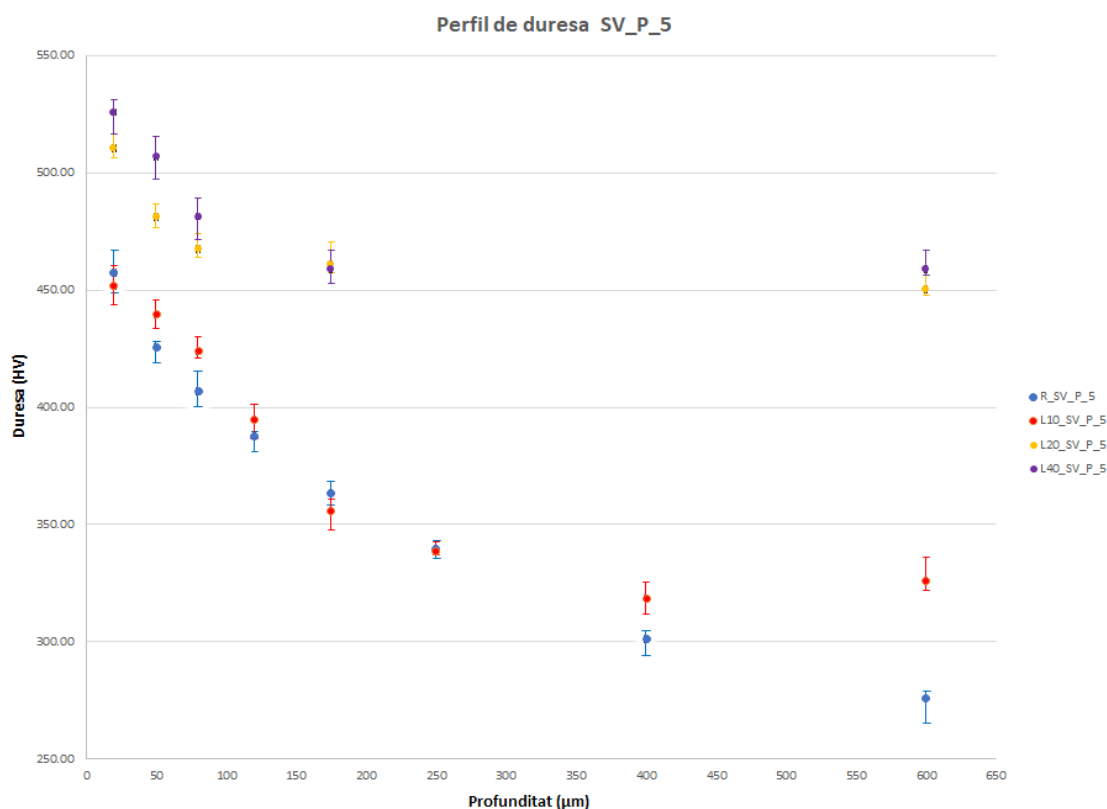


Figura 3.20. Evolució dels perfils de duresa en funció del contingut de martensita inicial en les mateixes condicions.

Làmina i condicions	Duresa del nucli (HV)	Duresa superficial (HV)	Increment (HV)
R_SV_P_5	275,74	457,51	181,77 65,9%
L10_SV_P_5	325,89	451,69	125,80 38,6%
L20_SV_P_5	450,26	510,54	60,28 13,4%
L40_SV_P_5	458,99	525,85	66,86 14,6%

Taula 3.5. Incrementos en valor numèric i percentatge de la duresa de cada làmina respecte el seu nucli.

CAPÍTOL 4:

ANÀlisi DE L'IMPACTE AMBIENTAL

Avui en dia l'impacte mediambiental o sostenibilitat és un tema que ha adquirit gran importància i reconeixement, definint-se com l'alteració del medi ambient provocat directa o indirectament per un projecte o activitat en una àrea determinada. Aquests projectes o activitats susceptibles de causar un impacte ambiental, en qualsevol de les seves fases, s'han de sotmetre a una avaluació a fi de protegir i preservar els recursos naturals, ja que són limitats. Per aquest motiu i degut a la necessitat d'emprar tecnologies no nocives per a la natura, es farà una valoració de l'impacte que ha causat el present projecte.

L'anàlisi de l'impacte ambiental s'estructura en dos parts, depenent de si les alteracions del medi s'han produït durant la preparació de les mostres o s'han originat mentre es realitzava les petjades amb el tractament de brunyit.

- **Impacte de la preparació de les mostres**

En el procés de preparació de mostres (mecanitzat i metal·lografies) identifiquem els següents inconvenients que poden perjudicar al medi ambient:

- Ús d'àcids i abrasius en petites quantitats.
- Partícules de material rebutjades sense cap tipus de tractament posterior.
- Consum energètic de la maquinària emprada.
- Generació de soroll perjudicial per a la salut de l'operari i l'entorn.
- Ús de taladrina.
- Fabricació de la maquinària, estris i químics utilitzats en el projecte que impliquen un consum de recursos naturals i energètics.

- **Impacte del tractament de brunyit**

Durant el procés de brunyit s'identifiquen alguns aspectes negatius que tenen un grau elevat d'impacte ambiental:

- Consum energètic elevat de la màquina CNC utilitzada per brunyir les mostres.
- Generació de soroll perjudicial per a la salut de l'operari i l'entorn
- Fabricació de l'eina i útils per brunyir que impliquen un consum de recursos naturals i energètics.

És important subratllar que la tècnica de brunyir, com ja s'ha comentat, és un procés d'acabat superficial que ofereix solucions positives i afables per reduir l'impacte ambiental, com per exemple:

- No necessita utilitzar olis ni lubricants químics per realitzar el tractament.
- És un acabat superficial en el qual no es dona arrencada de ferritja, això fa que no produeixi residus.

CAPÍTOL 5:

CONCLUSIONS

L'objectiu d'aquest projecte ha estat analitzar els efectes que produeixen les diferents condicions (vibració en l'eina de brunyir, direcció del brunyit i número de passades) , que intervenen en un tractament de brunyit, sobre les propietats mecàniques d'un acer inoxidable austenític metastable (AISI 301 LN), amb diferents quantitats de fase martensítica inicial. Per aquest motiu, s'han avaluat dues condicions d'aquest acer, una de recuit i una de laminat en fred. A més, s'han comparat els resultats d'aquest treball amb els obtinguts paral·lelament en un mateix projecte que estudia dos condicions més de laminat en fred (L10 i L20) [30]. Tot seguit, s'exposen les conclusions més rellevants, extretes en funció dels resultats obtinguts:

SUPERFÍCIE DE LES MOSTRES

- L'augment de la rugositat provocat pel procés de brunyit és més significatiu en el cas de l'acer recuit. En aquest cas concret, veiem com obté una rugositat més gran amb una passada que no pas amb cinc, mentre que a les demés làmines (L10, L20 i L40) els hi succeeix l'efecte contrari. Al realitzar cinc passades assoleixen valors de rugositat superficial més elevats, degut a que aquestes últimes làmines tenen més presència de martensita inicial, que provoca una disminució de la resistència al desgast i necessiten més passades per crear irregularitats.
- En les quatre condicions estudiades de l'acer, s'observa que en els valors obtinguts de la rugositat superficial de les petjades, no existeix cap diferencia significativa en funció de si aquestes s'han realitzat amb l'eina de brunyir assistida amb vibració o sense ella.
- En referència a la realització de les petjades en direcció paral·lela o perpendicular al laminat, s'ha experimentat una lleugera influència diferenciada entre ambdues condicions, ja que en la direcció perpendicular s'aconsegueixen uns resultats de rugositat més elevats que en la direcció paral·lela.
- L'anàlisi detallat de la superfície mitjançant microscòpia òptica confocal indica que l'efecte causat pel brunyit és més agressiu per l'acer recuit amb la formació de mecanismes d'arrossegament de material.

MICROESTRUCTURA DE LES MOSTRES

- El procés de brunyit afavoreix un augment molt significatiu de la duresa superficial per a les quatre condicions de l'acer i sobretot amb els següents paràmetres de brunyit aplicats: sense vibració, direcció perpendicular al laminat i en cinc passades. L'espessor de la capa endurida és com a mínim de 80 micres. S'ha observat que la capa endurida és més gran en els materials que presenten baix contingut de fase martensítica inicial.
- A nivell microestructural tampoc s'observa cap diferència entre realitzar la petjada amb vibració o sense. Per tant, es verifica que la vibració no presenta cap influència significativa ni a nivell superficial ni microestructural.
- Mitjançant la tècnica de brunyit amb bola, ens acers amb propietats similars a la làmina en estat de recuit, poden arribar a assolir valors de duresa molt pròxims o gairebé semblants a la d'un acer laminat amb un 38% de contingut de martensita inicial.

CAPÍTOL 6:

PRESSUPOST

El cost total d'aquest projecte s'ha estructurar en funció del cost de cada un dels materials que s'han utilitzat al llarg de l'estudi, el cost generat per les màquines emprades i pel cost que pertany a la feina realitzada per cada persona involucrada en el projecte. Si aquest projecte fos sol·licitat per alguna empresa en un centre d'investigació metal·lúrgica, el seu cost ascendiria a 31674,21 €. Els detall es mostren en les següents taules:

<i>Material</i>	<i>Unitats</i>	<i>Preu unitari</i>	<i>Cost total (€)</i>
Acer Recuit	0,28 kg	2,55 €/kg	0,71
Acer Laminat	0,84 kg	2,20 €/kg	1,85
Mecanitzat amb ciselladora	32	3 €/proveta	96
Baquelita	0,2 kg	89 €/kg	17,8
Acetona	0,8 l	10 €/l	8
Suspensió de diamant 6 µm	0,05 l	118 €/l	5,9
Suspensió de diamant 3 µm	0,025 l	118 €/l	2,95
Disc de polit P80	2	1,8 €/disc	3,6
Disc de polit P320	2	1,3 €/disc	2,6
Disc de polit P600	2	1,3 €/disc	2,6
Disc de polit P1200	2	1,3 €/disc	2,6
Disc de polit P2500	2	1,3 €/disc	2,6
Disc magnètic 6 µm	1	24 €/disc	24
Disc magnètic 3 µm	1	24 €/disc	24
TOTAL			195,21 €

Taula 6.1. Cost del material utilitzat en el projecte.

Maquinària	Hores	Preu horari (€/h)	Cost total (€)
Fresadora CNC (brunyit)	6	25	150
Microscopi òptic confocal	16	20	320
Interferòmetre	25	45	1125
SEM	6	100	600
Rugosímetre 3D	30	15	450
Talladora Streuers	5	10	50
Encastadora	8	8	64
Polidora manual	12	10	120
Microduròmetre	40	30	1200
TOTAL			4079 €

Taula 6.2. Cost de la maquinària utilitzada en el projecte.

Operari	Hores	Preu horari (€/h)	Cost total (€)
Tutors (2)	80	60	4800
Projectista	720	30	21600
Tècnics de laboratori	20	50	1000
TOTAL			27400 €

Taula 6.3. Cost dels honoraris per la feina realitzada de cada persona en el projecte.

TOTAL DEL PROJECTE

31674,21 €

CAPÍTOL 7:

BIBLIOGRAFIA

- [1] Pero-Sanz Elorz, J. A. Aceros: metal·lúrgia física, selección y diseño.
- [2] Gabrielle Di Caprio, Los Aceros Inoxidables, Editorial: Grupinox, 1ª ed. Madrid: 1987.
- [3] Columbier y Hochmann. 1965. Aceros inoxidables, Aceros refractarios. Ediciones URMO: 29-138.
- [4] Euro Inox. Stainless Steel: Tables of Technical Properties. Second Edition 2007. Materials and Applications Series, Volume 5.
- [5] Boletín Técnico nº11, Nomenclatura de aceros. FASTPACK.
<https://es.scribd.com/document/349810735/nomenclatura-de-aceros-pdf>
- [6] **KEMPPAINEN, J.; SHEDIN, E.M.; SÖRQVIST, E.** *HyTens creates new opportunities for high strength stainless steel applications*. Suecia, AvestaPolarit AB, 2002.
- [7] **HEDSTRÖM, P.** *Deformation induced martensitic transformation of metastable stainless steel AISI 301*. Lulea University, 2007.
- [8] **HARVEY, P. D.** *Engineering properties of steel: Metals Park*. Ohio, ASM, 1982.
- [9] **MATEO, A.; ZAPATA, A.C.; FARGAS, G.** *Effect of cold rolling on the high cycle fatigue behaviour of an AISI 301LN stainless steel*, CIEFMA. Barcelona, España, 2011.
- [10] **ZAPATA, A.C.** *Mecanismos de Deformación en Aceros Inoxidables Austeníticos Metaestables*. Projecte de tesis doctoral. 2010. Barcelona, UPC.
- [11] **MORRIS, J.; KRENN, C.; ROUNDY, D.; COHEN, M.L.** *Deformation at the limit of elastic stability*, Mater. Sci. Eng. A, vol. 309-310, pp. 121-124, Jul. 2001.
- [12] **TORRES-LÓPEZ, E.A.; ARBELÁEZ-TORO, J.J.** HINCAPIÉ-ZULUAGA, D.A.; *Teoría cristalografica de la transformación martensítica. Tecno Lógicas*, vol.17, no.33, pp 77-90. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2014.
- [13] **OSENDI, M.J.; MOYA, J.S.** *Fundamentos de la Transformació Martensítica. Su Importancia en el Diseño de Futuros Materiales Cerámicos*, Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr. Vol. 21 Num-1.
- [14] Transformación Martensítica. [En línia]
http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm07/pfcm7_4_3.html

- [15] **NAVEA, L.; MANNHEIM, R.; GARÍN, J.** *Transformación Martensítica Mediante Deformación en Frío de Fundaciones Nodulares Austemperadas*, Revista de la facultad de ingeniería, pág. 21-26, Universidad de Atacama, 2006.
- [16] **TALONEN, J.; HÄNNINEN, H.** *Formation of shear bands and strain-induced martensite during plastic deformation of metastable austenitic stainless steels*. October 2007. Helsinki, University of Technology.
- [17] **KIRK, D.; PAYNE, N.J.** *The 7th International conference on shot peening*, Polant, pp.15-22, 1999.
- [18] **REED HILL, R.** *Principios de Metalurgia Física*. México, 2da Edición. Editorial CESCA. 1986.
- [19] **SALDAÑA, Alberto; SALDAÑA, Adriana; FLORES, A.; SALDAÑA, N.; GUTIÉRREZ, C.** *Bruñido con bola como proceso de acabado superficial y mejoramiento de propiedades físico-mecánicas de piezas manufacturadas*, Temas de ciencia y tecnología, vol.21, nº61, pp.41-49, Universidad de Guanajuato, México, 2017.
- [20] **GÓMEZ GRAS, G.** *Estudio del proceso del bruñido con bola asistido por una vibración*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2015.
- [21] **JEREZ, R.** *Design and characterisation of the VABB tool*. Proyecto de tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2017.
- [22] **Stainles Steel Grade Datasheets**, Atlas Steels (November 2011)
- [23] **DURAN AVITES, A.M.** *Efecto de la predeformación en la vida a fatiga de un acero inoxidable austenítico metaestable*. PFC. ETSEIB (UPC), 2009
- [24] **HINOJOSA, M.; REYES, M.E.** *La rugosidad de las superficies: Topometría*. Ingenierías. (Abril – Juny 2001) . Vol. IV, Núm. 11.
- [25] **NARVÁEZ, D.J.** *La Microscopía: Herramientas para estudiar células y tejidos*. [En línea]
http://www.medic.ula.ve/histologia/anexos/microscopweb/MONOWEB/capitulo_6_7.htm
- [26] **SWAP, S.** SEM. University of Wyoming. [En línea]
https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html
- [27] **Principios básicos de la interferometria**. Interferómetro. [En línea]
<https://www.ecured.cu/Interfer%C3%B3metro>
- [28] <https://www.upc.edu/sct/es/equip/407/interferometro-optico-laser.html>
- [29] **Microduròmetre i microdureza**. [En línea]
<http://www.uam.es/docencia/labvfmtat/labvfmtat/Anexo/microdurometro.htm>

[30] **RODRIGUEZ MAÑÁ, E.** *Aplicació de la tècnica de brunyit per a la millora de les propietats dels acers inoxidable austenítics metastables*. TFG (Maig 2018). Universitat Politècnica de Catalunya (EEBE).

ANNEX A

A1. Resultats obtinguts mitjançant microscòpia òptica làser

I. Resultats obtinguts amb el Microscopi òptic confocal

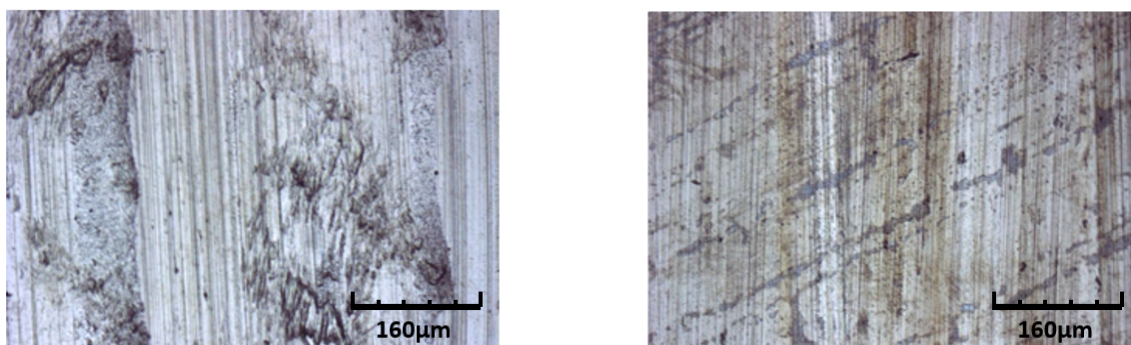


Figura 1.I.1. *Esquerra:* Làmina en condició de recuit amb 1 passada; *Dreta:* Làmina en condició de recuit amb 5 passades.

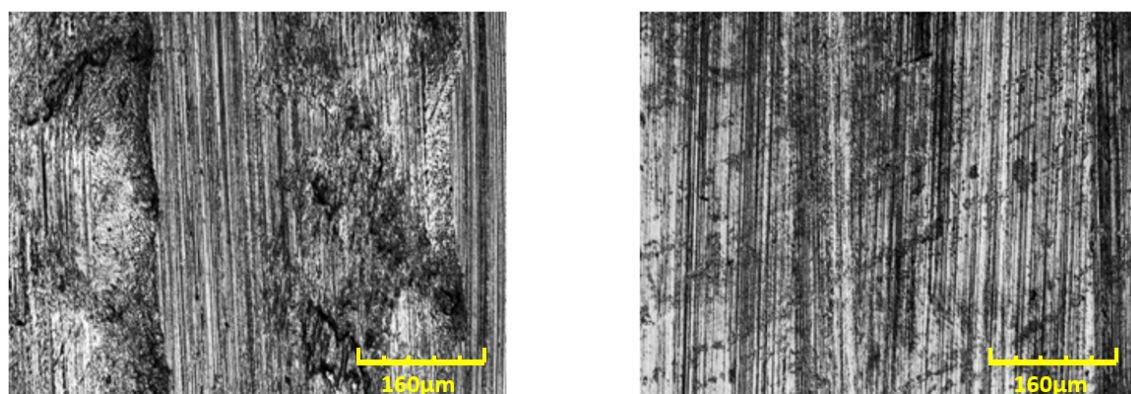


Figura 1.I.2. *Esquerra:* Làmina en condició de recuit amb 1 passada (Confocal); *Dreta:* Làmina en condició de recuit amb 5 passades (Confocal).

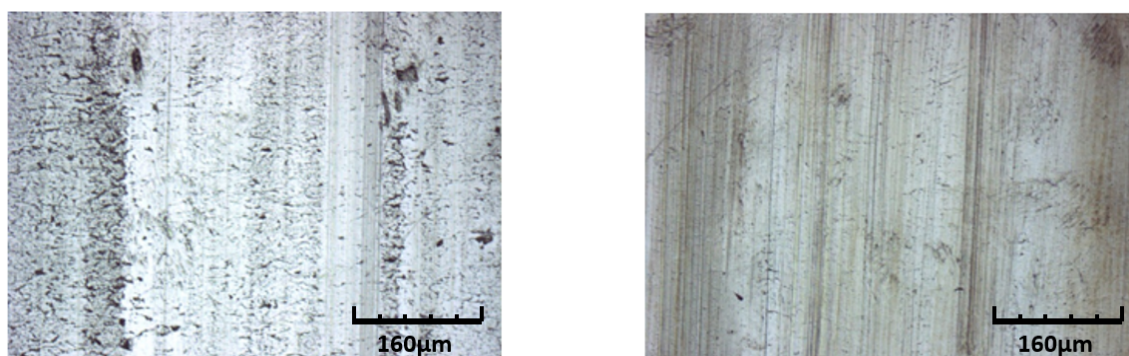


Figura 1.I.3. *Esquerra:* Làmina 10% de martensita inicial amb 1 passada; *Dreta:* Làmina 10% de martensita inicial amb 5 passades. ^[30]

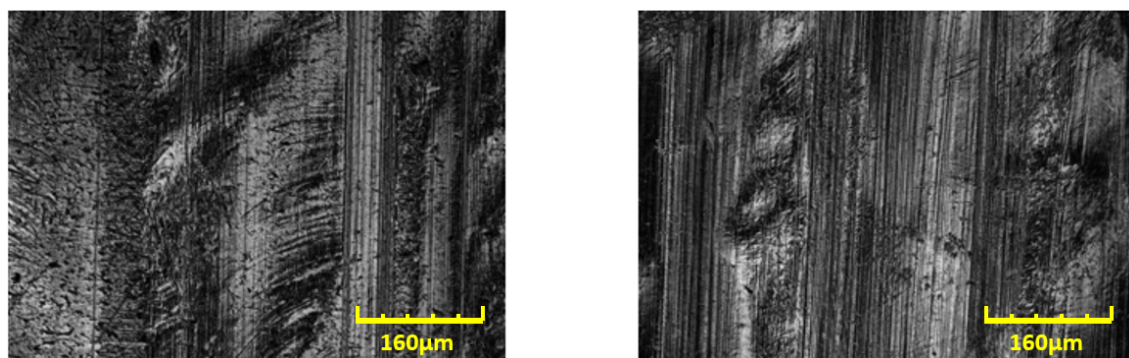


Figura 1.I.4. *Esquerra:* Làmina 10% de martensita inicial amb 1 passada (Confocal); *Dreta:* Làmina 10% de martensita inicial amb 5 passades (Confocal). ^[30]

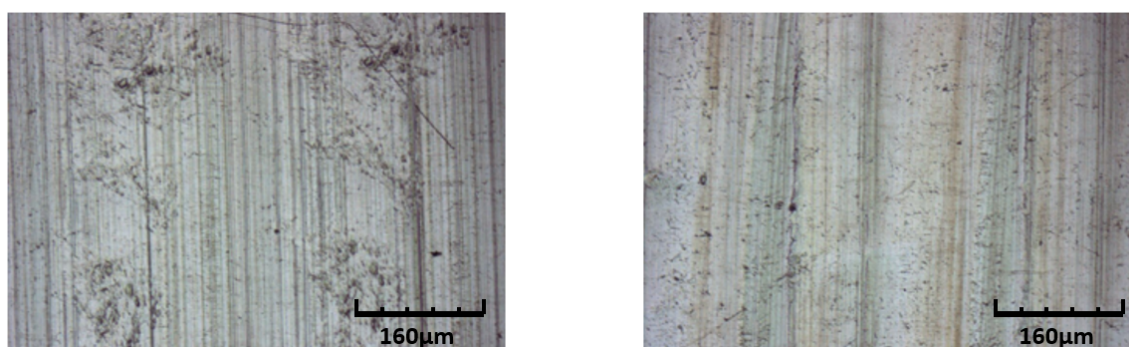


Figura 1.I.5. *Esquerra:* Làmina 18% de martensita inicial amb 1 passada; *Dreta:* Làmina 18% de martensita inicial amb 5 passades. ^[30]

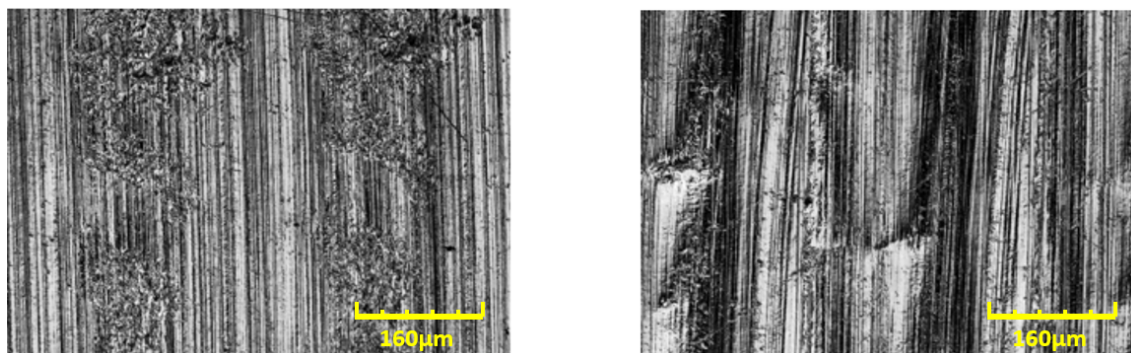


Figura 1.I.6. *Esquerra:* Làmina 18% de martensita inicial amb 1 passada (Confocal);
Dreta: Làmina 18% de martensita inicial amb 5 passades (Confocal).^[30]

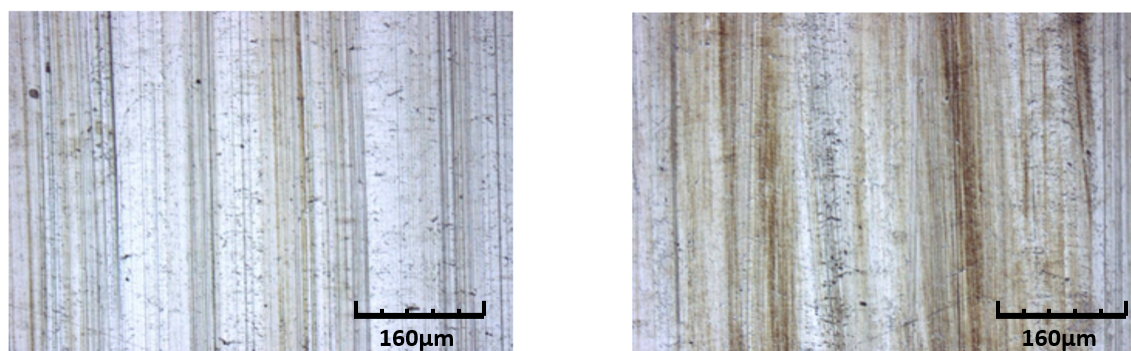


Figura 1.I.7. *Esquerra:* Làmina 38% de martensita inicial amb 1 passada; *Dreta:* Làmina 38% de martensita inicial amb 5 passades.

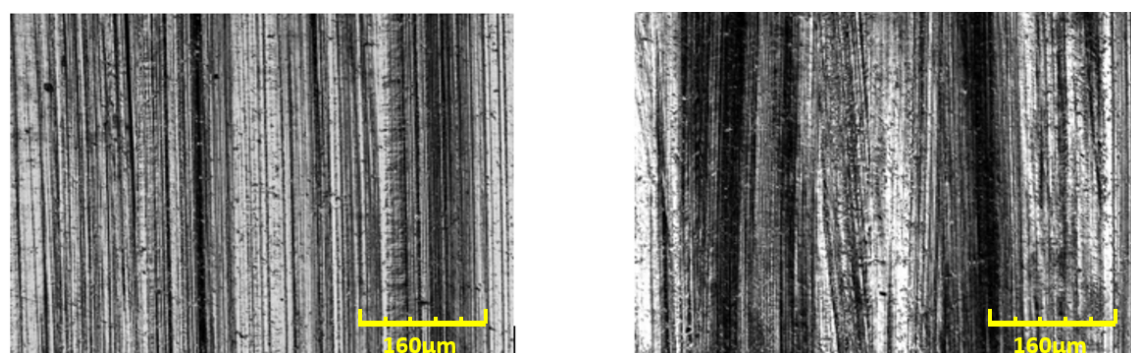


Figura 1.I.8. *Esquerra:* Làmina 38% de martensita inicial amb 1 passada (Confocal);
Dreta: Làmina 38% de martensita inicial amb 5 passades (Confocal).

A2. Resultats obtinguts de la rugositat superficial

I. Resultats obtinguts amb el Rugosímetre 3D

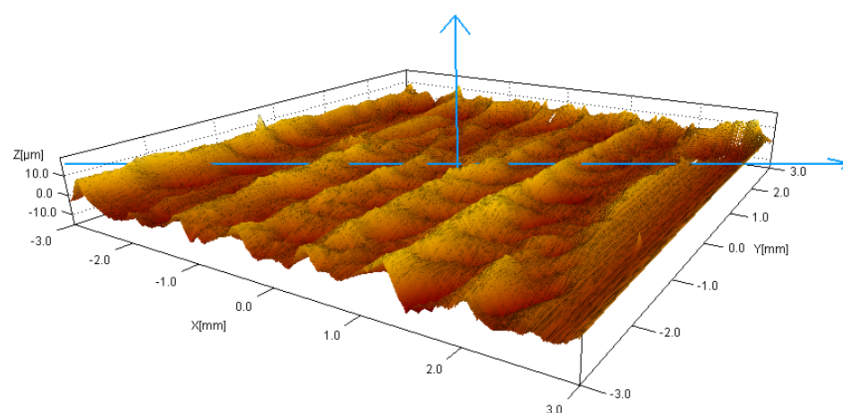


Figura 2.I.1. R_SV_P_1

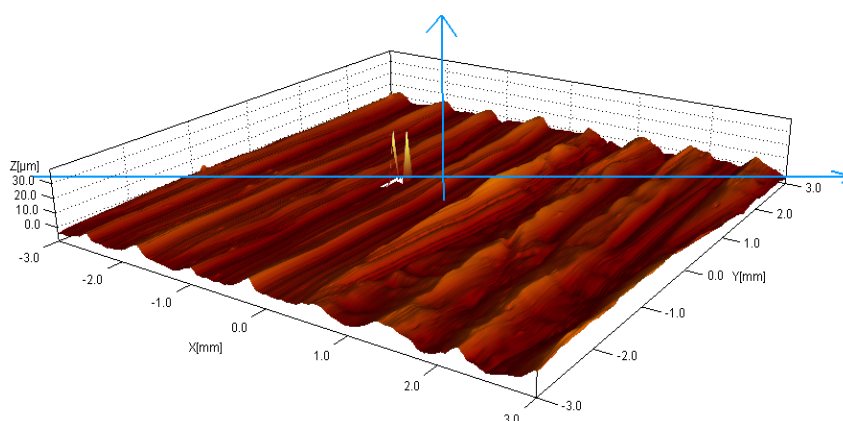


Figura 2.I.2. R_SV_P_5

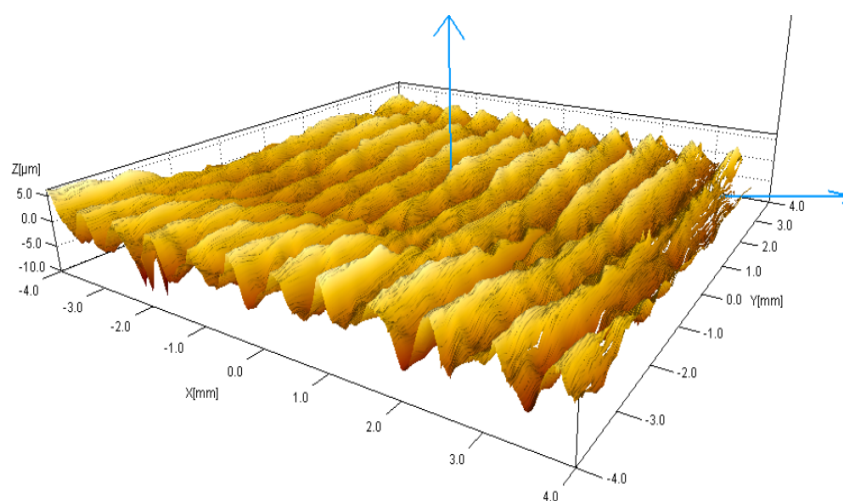


Figura 2.I.3. L10_SV_P_1 ^[30]

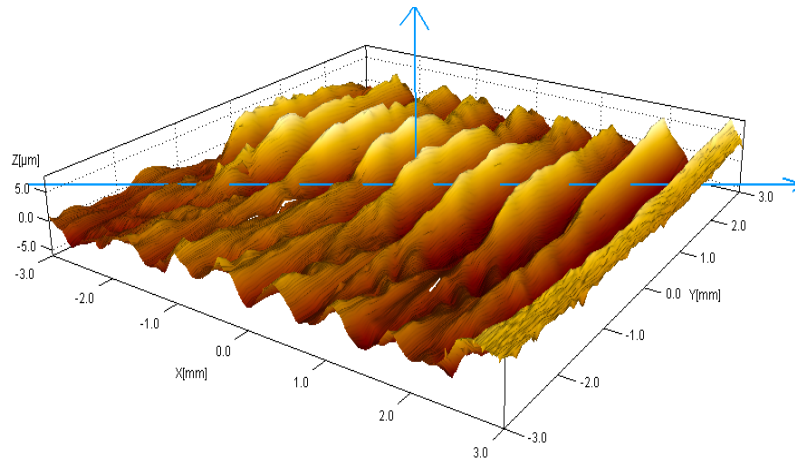


Figura 2.I.4. L10_SV_P_5 ^[30]

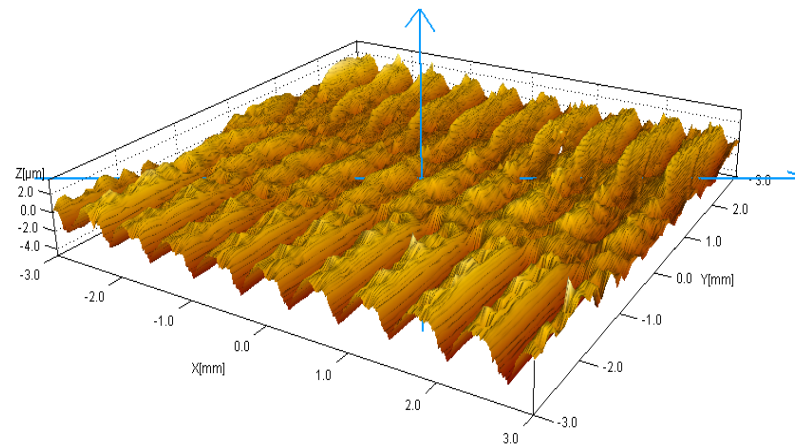


Figura 2.I.5. L20_SV_P_1 ^[30]

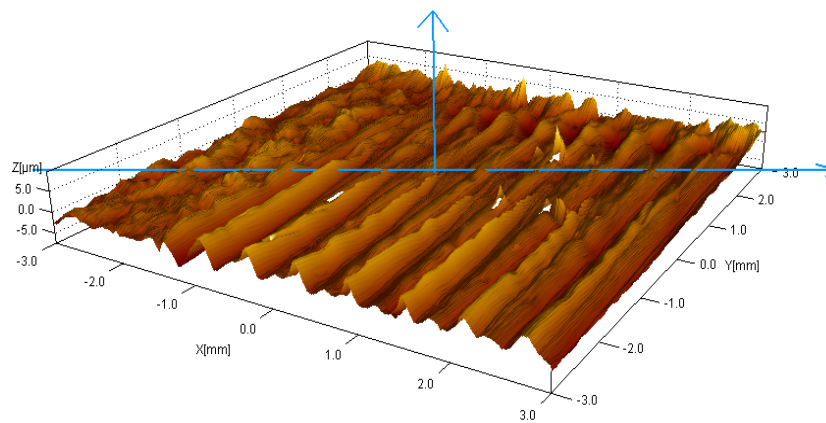


Figura 2.I.6. L20_SV_P_5 ^[30]

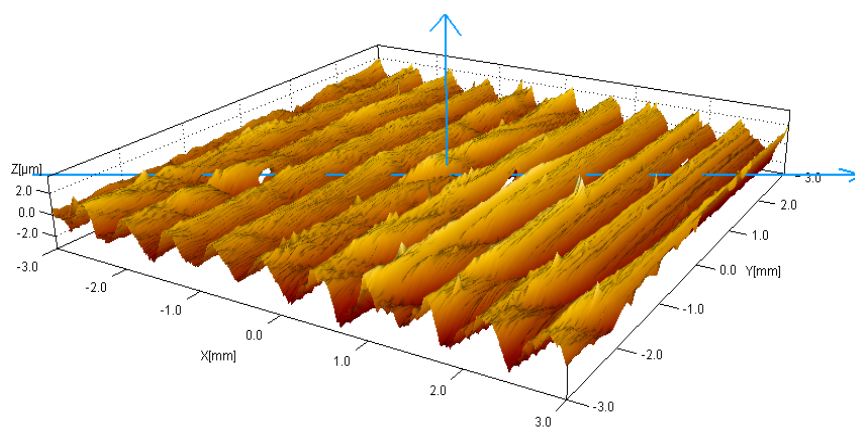


Figura 2.I.7. L40_SV_P_1

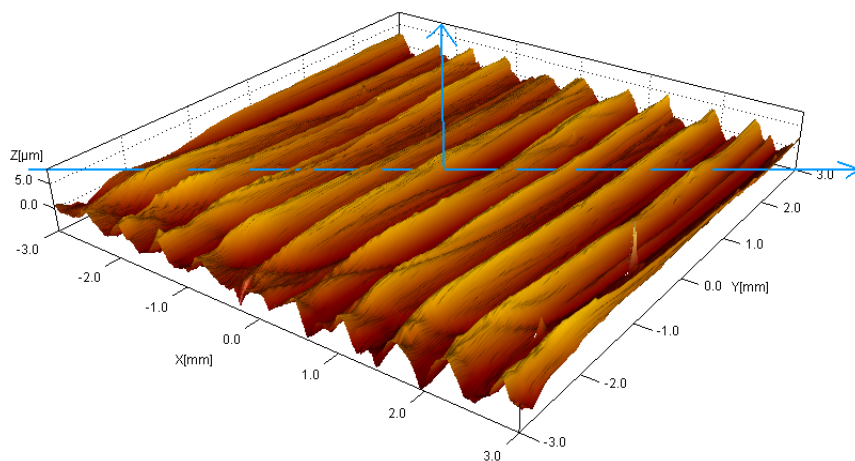


Figura 2.I.8. L40_SV_P_5

II. Resultats obtinguts amb l'interferòmetre

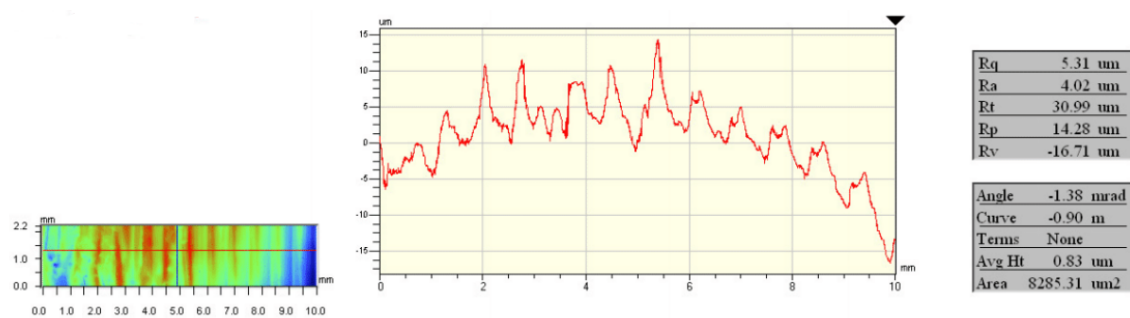


Figura 2.II.1. Perfil de rugositat superficial de la mostra R_SV_P_5

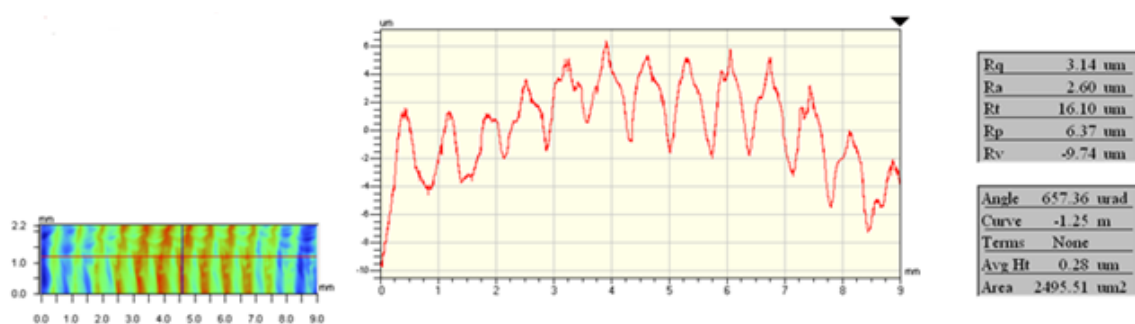


Figura 2.II.2. Perfil de rugositat superficial de la mostra L10_SV_P_5 [30]

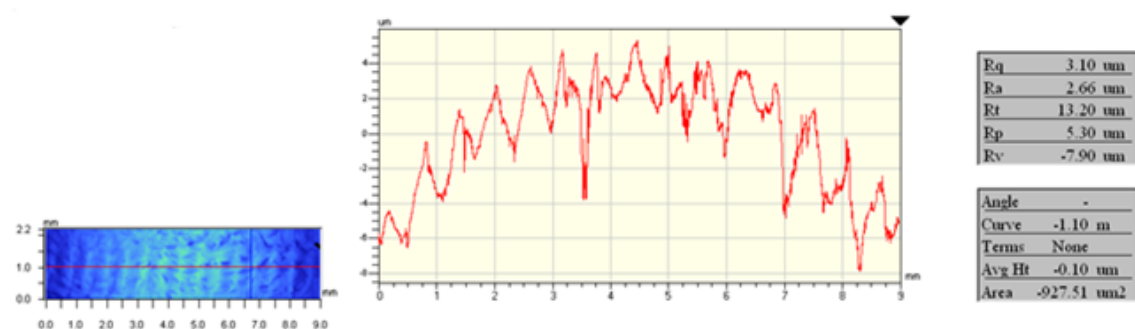


Figura 2.II.3. Perfil de rugositat superficial de la mostra L20_SV_P_5 [30]

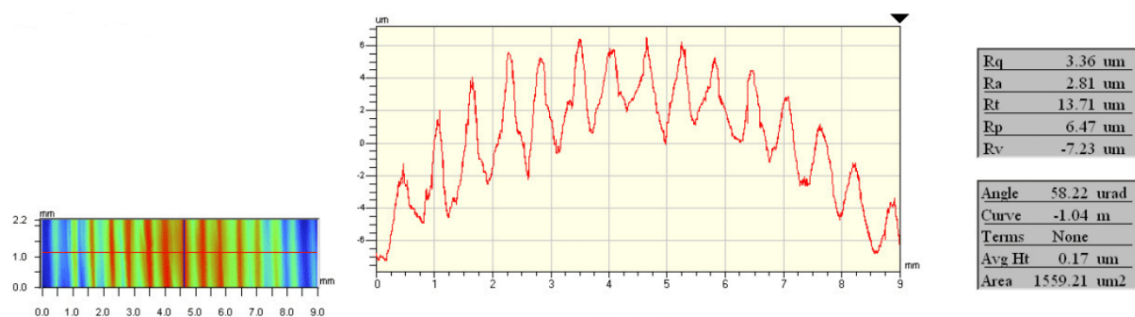


Figura 2.II.4. Perfil de rugositat superficial de la mostra L40_SV_P_5

A3. Resultats obtinguts amb microduròmetre

I. Taules numèriques de les dureses

Duresa Vickers (HV)

Profunditat (μm)	20	50	80	120	175	200	400	600
R_SV_P_5	457,51	425,74	406,83	387,88	363,52	339,84	301,28	275,74
R_SV_L_5	466,12	456,46	428,16	395,75	376,54	325,21	288,86	253,74
R_AV_L_5	460,13	432,93	427,25	399,01	381,03	337,65	306,19	284,34
R_AV_P_5	436,92	421,27	404,77	387,08	351,09	346,17	303,08	287,70
L10_SV_P_5	451,69	439,52	423,85	394,90	355,89	338,61	318,64	325,89
L10_SV_L_5	412,89	403,19	378,42	367,51	350,97	335,75	329,20	314,83
L10_AV_L_5	438,66	411,74	402,47	367,61	358,51	338,90	334,32	326,40
L10_AV_P_5	431,91	411,32	413,44	379,11	361,83	351,35	325,36	327,90
L20_SV_P_5	510,54	481,17	467,59		461,21			450,26
L20_SV_L_5	466,81	468,45	454,82		461,30			440,12
L20_AV_L_5	499,44	461,37	441,72		431,19			425,86
L20_AV_P_5	488,13	458,45	445,79		430,17			434,23
L40_SV_P_5	525,85	506,75	481,45		458,99			458,99
L40_SV_L_5	461,81	446,13	487,79		459,36			440,61
L40_AV_L_5	519,26	474,75	484,99		452,11			469,72
L40_AV_P_5	448,82	438,38	443,78		429,99			424,62

Taula 3.I.1 Taula numèrica de les dureses de cada mostra a diferents profunditats de la secció transversal.

II. Gràfiques dels perfils de duresa

- **Làmina R**

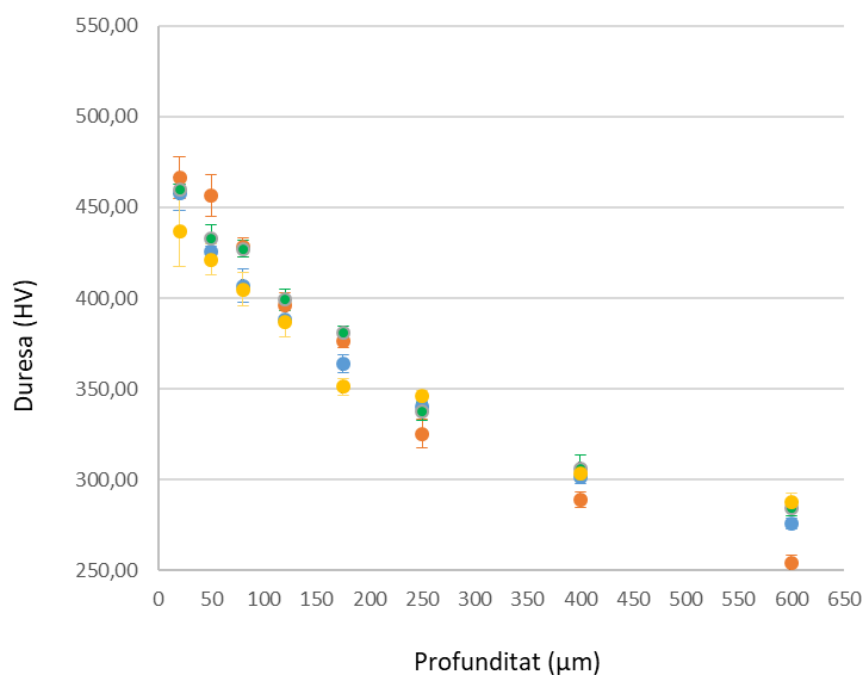


Figura 3.II.1. Perfil de duresa de la làmina R per a les condicions de vibració i direcció del brunyit

- **Làmina L10**

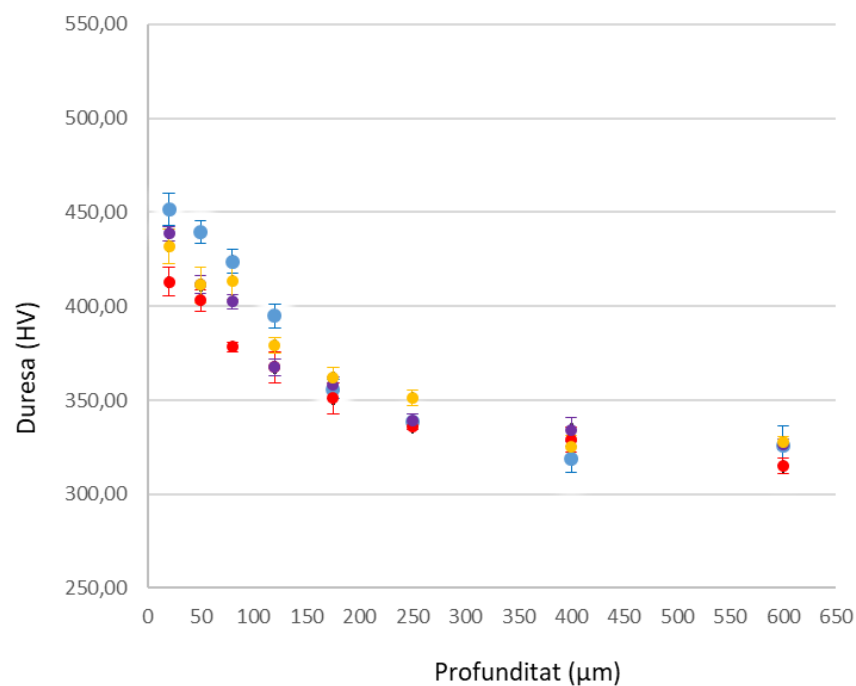


Figura 3.II.2. Perfil de duresa de la làmina L10 per a les condicions de vibració i direcció del brunyit. ^[30]

- Làmina L20

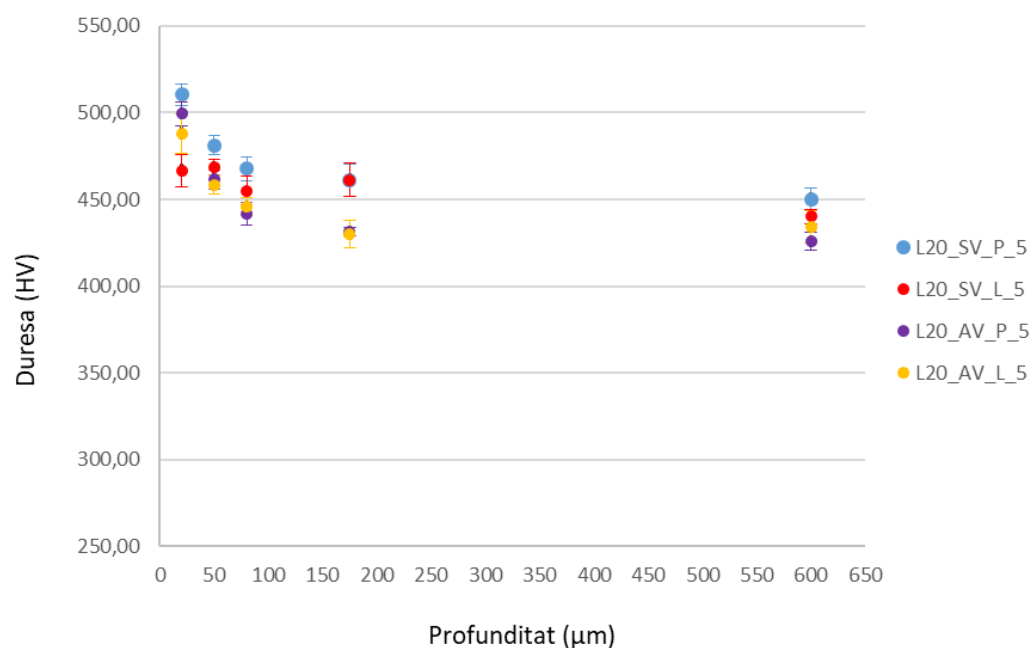


Figura 3.II.3. Perfil de duresa de la làmina L20 per a les condicions de vibració i direcció del brunyit. ^[30]

- Làmina L40

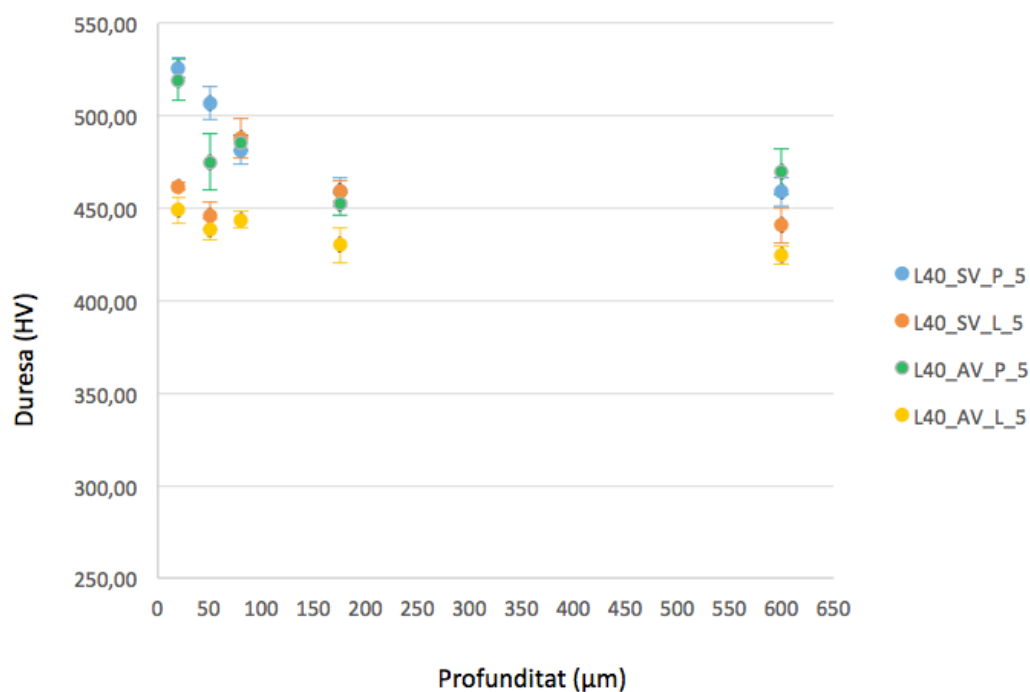


Figura 3.II.4. Perfil de duresa de la làmina L40 per a les condicions de vibració i direcció del brunyit

